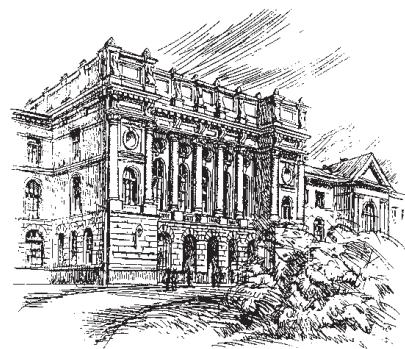


2-2(147)/2012



# Научно-технические ведомости СПбГПУ

НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

Министерство образования и науки РФ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПБГПУ

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

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

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

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

## СЕРИЯ «НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ»

### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ

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

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

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

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

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

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

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

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

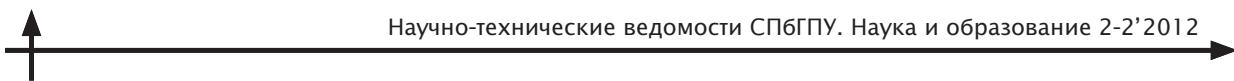
С 2005 года журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Национальной электронной библиотеки на сайте <http://www.elibrary.ru>

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

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

© Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет, 2012



## Содержание

<i>Выступление Президента России Владимира Владимиоровича Путина на Общем собрании РАН.....</i>	9
<b>Железняков А.Б., Кораблёв В.В.</b> <i>Освоение космоса Китайской Народной Республикой .....</i>	13
<b>Благовещенский А.Я.</b> <i>Некоторые вехи создания и развития корабельной ядерной энергетики (вспоминания, впечатления, размышления).....</i>	22

### Энергетика и электротехника

<b>Киселёв В.Г.</b> <i>Термодинамическая и кинетическая трактовка потенциала погружения и связь его с коррозией по батерлинии.....</i>	34
<b>Леонтьев Р.А., Рассохин В.А.</b> <i>Основные пути повышения экономичности газопаровых установок...</i>	40
<b>Куриленко Н.И., Максимов В.И., Мамонтов Г.Я., Нагорнова Т.А.</b> <i>Математическое моделирование сопряженного теплопереноса в системе с радиационным источником нагрева.....</i>	48
<b>Зеленин А.С., Кузнецов В.Л., Попов М.Г.</b> <i>Разработка микропроцессорного испытательно-диагностического комплекса средств релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем ...</i>	53
<b>Ноздрин Г.А., Абакшин А.Ю., Куколев М.И.</b> <i>Учет влияния дополнительных объемов при расчете двигателей с внешним подводом теплоты по циклу Шмидта .....</i>	59
<b>Сысоев А.В., Смоловик С.В.</b> <i>Разработка алгоритма расстановки источников реактивной мощности в сложной электрической сети.....</i>	62
<b>Михеев П.Ю., Тананаев А.В.</b> <i>Методика экспергетического анализа жизненных циклов энергетических объектов .....</i>	70

### Машиностроение

<b>Грачев А.А., Соколов С.А.</b> <i>Влияние неплоскостиности элементов на работоспособность тонкостенных металлических конструкций грузоподъемных машин .....</i>	78
<b>Макар Ю.В.</b> <i>Расчет числа работающих зерен на площадке контакта алмазного шлифовального круга с поверхностью заготовок.....</i>	81
<b>Пелевин Н.А., Пискарев П.Ю., Прокопенко В.А.</b> <i>Исследование и анализ возможностей различных систем управления для шпиндельных гидростатических подшипников тяжелого расточного модуля .....</i>	85
<b>Фоломкин А.И., Мурашкин С.Л.</b> <i>Эксплуатационные свойства торцовых фрез с корпусами из сталяфибробетона.....</i>	92
<b>Зуев А.В., Юн В.К., Фафинов М.А.</b> <i>Проектирование сухих газодинамических уплотнений с учетом особенностей их эксплуатации в центробежных нагнетателях природного газа.....</i>	95
<b>Новиков В.И., Мурашкин С.Л., Фоломкин А.И.</b> <i>Технологические возможности чистовой обработки турбинных лопаток электролитно-плазменным методом .....</i>	105
<b>Иванов А.В., Ваганов В.В., Котов К.А.</b> <i>Предварительный расчет схемы управления потоками заказов на полиграфическом производстве.....</i>	108
<b>Романов П.И., Викторенкова С.В.</b> <i>Разработка сбалансированных манипуляторов для ремонта лесозаготовительных машин.....</i>	112



**Никитков Н.В., Макар Ю.В.** Математическая модель режущей способности алмазных кругов при шлифовании заготовок из твердых хрупких материалов ..... 116

**Русинов Р.В., Добрецов Р.Ю.** Эффективность теплового цикла «адиабатного» двигателя внутреннего сгорания с комбинированным наддувом ..... 121

### Металлургия и материаловедение

**Разумов Н.Г., Попович А.А., Силин А.О.** Получение перспективных криогенных азотосодержащих порошковых аустенитных сталей с нанокристаллической структурой ..... 128

**Глазков А.В.** Технология холодной гибки труб методом продольного раскатывания ..... 132

**Котов С.А., Марков В.А., Марков А.Н., Мальцев А.А.** Исследование скорости изнашивания композиционного покрытия ПК40Х2, нанесенного методом электроконтактного припекания ..... 136

**Волкова Е.Н., Демидов А.И.** Получение рентгенографически чистого монокристаллического гексагидрата сульфата никеля ..... 139

**Карасев М.В., Работинский Д.Н., Черкасова Л.Г., Павлов К.А., Беляев А.Е., Стешенкова Н.А.** Перспективы развития источников питания дуговой сварки для отечественного судостроения ..... 144

**Латышев Д.В., Митюков А.А., Петров М.Ю., Попов В.А.** Вязкопластические свойства хромоникелевой стали при возрастающих и постоянных нагрузках. Часть 1 ..... 151

**Башенко В.В., Охапкин К.А.** Выбор параметров режима точечной сварки трением с учетом влияния термического цикла на структуру алюминиевых сплавов ..... 160

### Моделирование. Математические методы

**Абакшин А.Ю., Ноздрин Г.А., Куколев М.И.** Численное моделирование процессов тепло- и массообмена в цилиндрах двигателя с внешним подводом теплоты ..... 164

**Чемеков В.В.** Построение математической модели системы автономного теплоснабжения на базе теплового насоса ..... 167

**Антощенко Т.В., Бородкин А.В., Мамутов В.С.** Компьютерное моделирование статико-импульсного формоизменения тонколистовых металлов подвижной средой ..... 172

**Толмачев В.В., Богоев И.А., Вахмянин С.М.** Методика проектировочного расчета вихревого запально-стабилизирующего модуля турбоустановок ..... 176

**Иванов А.В., Ваганов В.В., Котов К.А.** Упорядочивание заказов по множеству критерии предпочтения посредством нейросетевого решения задачи сортировки ..... 181

**Елистратов В.В., Минина А.А.** Моделирование энергетически эффективной части ветрового потока за краткосрочные интервалы времени ..... 185

### Техносферная безопасность

**Попов А.Н., Полищук М.Н.** Аналитическая оценка эффективности использования рукавных спасательных устройств при ликвидации чрезвычайных ситуаций ..... 190

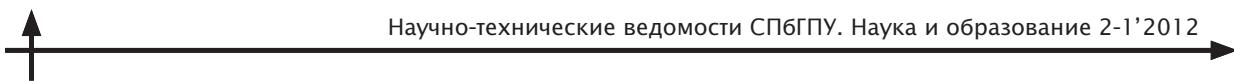
**Гвоздяков Д.В., Губин В.Е., Кузнецов Г.В.** Численная оценка формирования условий атмосферного образования серной кислоты в районе расположения тепловой электрической станции ..... 195

**Крутолапов А.С.** Методика обнаружения и коррекции прерываний вне протокола в сетях передачи данных подразделений ГПС МЧС России ..... 200

**Розов А.Л., Русина Н.Ю., Атоян Г.Л.** Разрушение бетонных плотин на мягком основании. Численное моделирование развития прорана в основании многосекционных плотин ..... 205

**Гуменюк В.И., Федосовский М.Е., Сыров А.А., Атоян Г.Л.** Принципы и методы повышения защищенности систем управления критически важных объектов ..... 209

**Крутолапов А.С., Сычев Д.А.** Процессы информационного обмена в сетях передачи данных на основе полевых шин ..... 225



### Природопользование

<b>Масликов В.И., Чусов А.Н., Негуляева Е.Ю., Черемисин А.В., Молодцов Д.В.</b> Лабораторные исследования разложения отходов в биореакторах для оценки биогазового потенциала и выбора мероприятий по рекультивации полигонов ТБО.....	229
<b>Арефьев К.М., Арефьев В.К., Федорович Е.Д., Шаркави М.Х.</b> Тепломассообмен в системе опреснения морской воды с солнечным нагревателем.....	236
<b>Усманова Р.Р.</b> Разработка научных основ рационального конструирования аппаратов газоочистки	240
<b>Попович А.А., Ван Цин Шен.</b> Исследования структуры и свойств анодных материалов литий-ионных полимерных аккумуляторов, полученных из растительного сырья .....	245
<b>Кулинкович А.В.</b> Образование активных форм кислорода в водных растворах солей урана при воздействии электромагнитных полей.....	249

### Строительство

<b>Деркач В.Н.</b> Анизотропия прочности на растяжение каменной кладки при раскалывании.....	259
<b>Киселёв В.Г.</b> Современные тенденции развития техники измерения потенциалов подземных металлических сооружений .....	265
<b>Харламов М.В.</b> Интерактивная подсветка как инструмент коммуникации в архитектуре .....	273
<b>Петриченко М.Р., Петроченко М.В.</b> Достаточные условия существование свободно-конвективного течения в вертикальном щелевом канале.....	276
<b>Мишаков В.А., Синяков Л.Н., Соколов В.А., Страхов Д.А.</b> Инженерно-диагностическое обследование строительных объектов Северо-Западной ТЭЦ.....	282

### Вопросы образования

<b>Шевелёв А.Н.</b> Проблемы взаимодействия базового и постдипломного педагогического образования: зарубежный опыт .....	288
<b>Демидов А.И.</b> К истории профессионального образования в России: Виллим Иванович Геннин (1676–1750).....	299
<b>Похолков Ю.П., Рожкова С.В., Толкачева К.К.</b> Современное инженерное образование как основа технологической модернизации России.....	302
<i>Сведения об авторах. Контактные данные .....</i>	307
<i>Аннотации. Ключевые слова .....</i>	315



## Contents

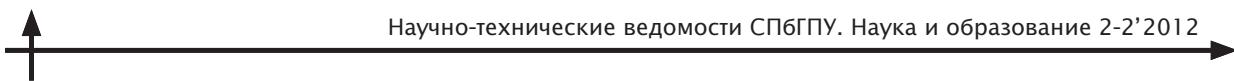
<i>Speech of the president of Russia Vladimir Vladimirovich Putin at General meeting of the Russian Academy of Sciences.....</i>	9
<b>Zheleznyakov A.B., Korablev V.V.</b> <i>Experience of space exploration by the people's republic of China.....</i>	13
<b>Blagoveshchensky A.Y.</b> <i>Some milestones of creation and development of nuclear energy Ship (Recollections, Impressions, Reflections).....</i>	22

### Power engineering and electrical engineering

<b>Kiselev V.G.</b> <i>Thermodynamic and kinetic treatment of the potential of sinking .....</i>	34
<b>Leontyev R.A., Rassokhin V.A.</b> <i>The basic ways of profitability improvement of gas and air installations .....</i>	40
<b>Kurilenko N.I., Maksimov V.I., Mamontov G.Y., Nagornova T.A.</b> <i>Mathematical modeling of conjugate heat transfer in system with radiation heat source.....</i>	48
<b>Zelenin A.S., Kuznetsov V.L., Popov M.G.</b> <i>Development of microprocessor-based probatory-diagnostic complex for power system relay protection and automation facilities.....</i>	53
<b>Nozdrin G.A., Abakshin A.Yu., Kukolev M.I.</b> <i>The accounting of additional volumes in calculations of a cycle of Schmidt.....</i>	59
<b>Sysoev A.V., Smolovik S.V.</b> <i>The algorithm of arrangement reactive power sources in complex power system.....</i>	62
<b>Mikheyev P.Yu., Tananayev A.V.</b> <i>Methods exergic life cycle analysis of energy objects.....</i>	70

### Mechanical engineering

<b>Grachev A.A., Sokolov S.A.</b> <i>Effect of flatness elements of performance lifting thin-wall structures.....</i>	78
<b>Makar Yu.V.</b> <i>Calculation of the number of workers at the site of grain diamond grinding wheel contact with the surface of the workpiece.....</i>	81
<b>Pelevin N.A, Piskarev P.Yu., Prokopenko V.A.</b> <i>Investigation and analysis of possibilities of various control systems for spindle hydrostatic bearings of the heavy machine tools.....</i>	85
<b>Folomkin A.I., Murashkin S.L.</b> <i>Using features of face mills with fibrous concrete cases .....</i>	92
<b>Zuev A.V., Yun V.K., Fafinov M.A.</b> <i>Design dry gas seals taking into account features of their operation in centrifugal chargers natural gas .....</i>	95
<b>Novikov V.I., Murashkin S.L., Folomkin A.I.</b> <i>Polishing alloyed steels in non-toxic electrolyte at high voltage .....</i>	105
<b>Ivanov A.V., Vaganov V.V., Kotov K.A.</b> <i>Predesign of the scheme of management by flows of orders on printing production.....</i>	108
<b>Romanov P.I., Viktorenkova S.V.</b> <i>Development of balanced manipulator for repair forest machines .....</i>	112
<b>Nikitkov N.V., Makar Yu.V.</b> <i>Mathematical model of cutting ability of diamond circles at grinding preparations from firm fragile materials. ....</i>	116
<b>Rusinov R.V., Dobretsov R.Yu.</b> <i>Thermal efficiency of the adiabatic twincharged internal combustion engine cycle.....</i>	121



## Metallurgy and materials technology

<b>Razumov N.G., Popovich A.A., Silin A.O.</b> Development cryogenic high nitrogen austenitic powder steel with nanocrystalline structure .....	128
<b>Glazkov A.V.</b> Technology for cold bending pipe longitudinal method of rolling .....	132
<b>Kotov S.A., Markov V.A., Markov A.N., Maltsev A.A.</b> Research of wear resistance of the composite covering «ПК40Х2» put with a method of an electrocontact pripekaniye .....	136
Volkova E.N., Demidov A.I. Receiving of the x-ray pure monocrystal nickel sulfate hexahydrate .....	139
<b>Karasev M.V., Rabotinskiy D.N., Cherkasova L.G., Pavlov K.A., Belyaev A.E., Steschenkova N.A.</b> Prospects of development of power supplies of arc welding for domestic shipbuilding .....	144
<b>Latyshev D.V., Mityukov A.A., Petrov M.Yu., Popov V.A.</b> Viscoplastic properties of chromium-nickel steel with the ever growing and a constant load. Part 1 .....	151
<b>Bashenko V.V., Okhapkin K.A.</b> Theoretical analysis of heat transfer processes during spot stir welding..	160

## Modeling. Mathematical methods

<b>Abakshin A.Yu., Nozdrin G.A., Kukolev M.I.</b> Numerical simulation of heat and mass transfer in cylinders of external heat supply .....	164
<b>Chemeckov V.V.</b> Development the mathematical model of autonomous heating system based on heat pump .	167
<b>Antoshenko T.V., Borodkin A.V. Mamutov V.S.</b> Computer simulation of combining of static loading and impulse loading under forming of sheet metal by mobile medium.....	172
<b>Tolmachov V.V., Bogov I.A., Vokhmyanin S.M.</b> Calculation methods of a drawing vortex glow-stabilizing module turbines.....	176
<b>Ivanov A.V., Vaganov V.V., Kotov K.A.</b> Organize by multiple criteria orders through preferences neuronet sorting solution.....	181
<b>Elistratov V.V., Minina A.A.</b> Modeling of energy-efficient part of the wind flow over short time intervals .	185

## Technospheric security

<b>Popov A.N., Polishchuk M.N.</b> The fire escape chutes efficiency analytical estimation while liquidation of emergency situations .....	190
<b>Gvozdyakov D.V., Gubin V.E., Kuznetsov G.V.</b> Numerical assessment of formation of conditions of atmospheric formation of sulfuric acid around the arrangement of thermal power plant.....	195
<b>Krutolapov A.S.</b> The technique of detection and correction of interruptions out of the protocol in networks of data transmission of divisions of government fire service ministry of emergency situations of Russia.....	200
<b>Rozov A.L., Rousina N.Y., Atoyan G.L.</b> About destruction of concrete dams on the soft basis .....	205
<b>Gumenyuk V.I., Fedosovskiy M.E., Syrov A.A., Atoyan G.L.</b> Principles and methods of improving protectability of control systems of critical facilities.....	209
<b>Krutolapov A.S., Sychev D.A.</b> Processes of information exchange in data transmission networks on the basis of field tyres .....	225

## Nature management

<b>Maslikov V.I., Chusov A.N., Negulyaeva E.Yu., Cheremisin A.V., Molodtsov D.V.</b> Laboratory research of waste decomposing in bioreactors for assessment of biogas potential and choice of measures for aftercare phase.....	229
<b>Arefyev K.M., Arefyev V.K., Fedorovich E.D., Sharqawy M.H.</b> Heatmasstransfer in sea water desalination systems with solar heater.....	236
<b>Usmanova R.R.</b> Development of scientific bases of rational design of devices of gas cleaning .....	240



<b>Popovich A.A., Van Cin Shen.</b> <i>Research of structure and properties anode materials for lithium-ion polymer batteries received from plant raw materials.....</i>	245
<b>Kulinkovich A.B.</b> <i>Formation of active forms of oxygen in water solutions of salts of uranium at influence of electromagnetic fields.....</i>	249

### The construction

<b>Derkach V.N.</b> <i>Anisotropy of the tensile strength of the masonry in splitting .....</i>	259
<b>Kiselev V.G.</b> <i>Contemporary tendencies of the development of technology of potential measurement of underground metallic construction .....</i>	265
<b>Kharlamov M.V.</b> <i>Interactive lighting as a communication tool in architecture.....</i>	273
<b>Petrichenko M.R., Petrochenko M.V.</b> <i>Sufficient conditions for existence of free convection flow in vertical narrow channels .....</i>	276
<b>Mishakov V.A., Sinyakov L.N., Sokolov V.A., Strakhov D.A.</b> <i>Engineering-diagnostic inspection of build objects of north-western TEC .....</i>	282

### Educational issues

<b>Shevelev A.N.</b> <i>Problems of interaction base and postgraduate pedagogical education: foreign experience .</i>	288
<b>Demidov A.I.</b> <i>To history of professional education in Russia: Villim Ivanovich Gennin (1676–1750) .....</i>	299
<b>Pokholkov Yu.P., Rozhkova S. V., Tolkacheva K.K.</b> <i>Modern engineering education as a basic element of technological modernization of Russia .....</i>	302
<i>About the authors. Contact information.....</i>	307
<i>Abstracts. Keywords .....</i>	324



## ВЫСТУПЛЕНИЕ ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ ВЛАДИМИРА ВЛАДИМИРОВИЧА ПУТИНА НА ОБЩЕМ СОБРАНИИ РАН



*Уважаемый Юрий Сергеевич, уважаемые коллеги, друзья!*

Прежде всего, спасибо большое за приглашение, за возможность выступить. Я бывал у вас неоднократно, и всегда это были очень интересные, содержательные беседы. С Юрием Сергеевичем мы встречаемся регулярно, совсем недавно виделись, обсуждали проблемы Академии, другие вопросы, говорили по глобальным проблемам.

Мы с вами хорошо знаем, что предстоящие десятилетия будут во многом решающими и для нас, и для очень многих стран мира — для мира, который не просто входит, а уже практически вошел в достаточно сложный период глобальной турбулентности. Формируются новые геополитические центры, меняются общественные, демографические тенденции, технологический уклад, жизнь меняется серьезным образом. Все эти процессы требуют самого глубокого осмысления — для того чтобы выработать и принять адекватные шаги и решения.

В связи с этим вновь подчеркну: нам нужна серьезная интеллектуальная работа над проек-

тами развития, над проектами будущего. Необходима система долгосрочного экономического, научного, технологического, оборонного прогнозирования. Мы также должны чувствовать и анализировать проблемы современного российского общества.

Очевидна колоссальная роль отечественной науки, прежде всего самой Академии наук. Считаю создание прочного фундамента и в естественных, и в гуманитарных дисциплинах обязательным, непреложным условием нашего модернизационного прорыва, залогом глобального лидерства России.

За прошедшие годы мы вместе с вами делали очень многое, чтобы вновь вернуть общественную и государственную значимость таким ценностям и понятиям, как просвещение, качественное образование, творчество, научная и исследовательская работа.

Да, проблем, конечно, здесь еще достаточно, они остаются. Но, думаю, многие в этом зале со мной согласятся, что так называемый период выживания для отечественной науки в целом завершился. Сама страна существенным образом изменилась, кратко возросли наши ресурсы. И сегодня мы должны говорить не просто о поддержке науки или даже о возвращении долгов, а о приоритетном партнерстве государства и науки, академий наук, всего научного и образовательного сообщества в интересах опережающего национального развития. Это один из безусловных наших приоритетов.

Хочу напомнить, с чего мы начинали: в 2002 году расходы федерального бюджета на гражданскую науку составляли около 30 миллиардов рублей. Напомню, что в прошлом году финансирование составило 323 миллиарда рублей (в 10 раз больше — даже с учетом инфляционных процессов), это существенный рост.

Мы ставим задачу уже к 2015 году довести планку расходов на научные исследования и раз-



работки, в том числе за счет привлеченных частных инвестиций, до уровня порядка 1,8 процента ВВП. Это пока меньше, чем в некоторых ведущих странах (в США, допустим, это 2,5 процента). Но мы будем идти к этой планке, к этому уровню, будем идти настойчиво, постепенно, соизмеряя эти шаги с нашими возможностями, но обязательно будем двигаться в этом направлении.

Также намерены самым активным образом привлекать научные организации, университеты к реализации программ инновационного развития компаний с государственным участием (там огромные ресурсы сосредоточены), планов по модернизации оборонно-промышленного комплекса.

Многие из присутствующих в этом зале знают, как складывались некоторые научные центры Академии наук: это был, по сути дела, прямой заказ оборонных отраслей. Я не говорю, что нужно обязательно к этому вернуться, да это и невозможно, и ни к чему, но использовать выделяемые ресурсы на решение задач по повышению обороноспособности страны, развивая одновременно науку, формулируя ей соответствующие заказы, — конечно, мы это будем делать.

Напомню, что гособоронзаказ у нас до 2020 года — 20 триллионов [рублей] и на переоборудование, по сути, промышленной базы — еще 3 триллиона. Прямое финансирование самой Академии наук за прошедшее десятилетие также возросло в пять раз, что позволило расширить программу исследований, привлечь молодые кадры, приступить к решению острых социальных проблем.

В 2002 году на Академию наук мы выделили 12,6 миллиарда [рублей], а в 2012 году выделяется уже 64 миллиарда. Средняя заработная плата в системе Академии наук в прошлом году составила около 34 тысяч рублей. Это, конечно, мало; конечно, это еще не отвечает квалификации, ответственности и профессиональным требованиям, которые сегодня предъявляются к специалистам, занятym в научной сфере, но все-таки это выше, чем средняя [зарплата] по экономике.

А что было раньше? В 2002 году у нас средняя [зарплата] по экономике была всего 4,1 тысячи, а в Академии — 4,3 тысячи, вот и вся заработная

плата. К 2018 году средняя заработная плата научных работников должна не менее чем в два раза превышать среднюю по экономике конкретного региона. Такая задача поставлена и, безусловно, будет решаться.

Кроме того, мы должны стремиться к тому, чтобы уровень доходов ведущих ученых (не уровень заработной платы, а уровень совокупных доходов), безусловно, был конкурентоспособным на глобальном уровне, был сопоставим с теми условиями, которые предлагаются в лучших университетах и исследовательских центрах мира.

Отдельно остановлюсь на решении жилищной проблемы сотрудников Российской академии наук, прежде всего — молодых ученых. Могу сказать, что на период до 2015 года в рамках Федеральной целевой программы «Жилище» на эти цели Академии выделено 6 миллиардов рублей.

Только этих ресурсов недостаточно, поэтому мы намерены активно поддерживать совместный проект РАН и Фонда РЖС [Федеральный фонд содействия развитию жилищного строительства] по строительству жилья для сотрудников Академии на участках, находящихся в федеральной собственности. Уже одно это позволит снизить стоимость квадратного метра процентов на 20 как минимум. Знаю, что в Сибирском отделении РАН уже стартовала такая pilotная программа. В результате около 400 семей молодых ученых получат собственное жилье.

Кроме того, будем продвигать идею жилищных кооперативов, в том числе для молодых ученых, а также специальных льготных ипотечных программ. И, конечно же, регионы здесь также должны подключиться, например с помощью при внесении первоначального взноса.

В ходе нашей недавней встречи с Юрием Сергеевичем, о которой я уже упоминал, мы обсуждали вопросы обновления материально-технической базы Академии, создания центров коллективного пользования. Мы об этом говорим уже не первый раз: проблема крайне важная — и с точки зрения научного результата, и для профессиональной, творческой самореализации специалистов, ученых именно у нас, в России. Мы договорились в ближайшее время вновь вернуться к этой теме и посмотреть, какие есть возможности у бюджета для дополнительной поддержки этих программ.



Здесь в целом хотел бы затронуть принципы финансирования исследований и организации работы научных коллективов. Конечно, мы должны использовать лучшие, наиболее эффективные практики, которые себя хорошо зарекомендовали.

Считаю, что независимая оценка деятельности научных организаций должна стать нормой в академической жизни. Эти подходы уже внедряются в Академии. Однако до настоящего времени через механизм оценки прошли только 73 из более чем 430 учреждений Российской академии наук. Конечно, нужно ускорить эту работу. Нужно убрать все то, что дискредитирует научное сообщество, снижает его авторитет. Тем более следует быть нетерпимым к тем, кто паразитирует на науке. И здесь хочу отметить принципиальную позицию членов Комиссии РАН по борьбе с лженаукой и фальсификацией научных исследований.

Укрепление стандартов научной, профессиональной этики, широкое информирование российского общества о реальных проблемах и достижениях отечественной науки, отстаивание ее международного престижа, конечно, тоже в числе приоритетных задач РАН.

Вы знаете, что сейчас идет подготовка единой долгосрочной программы фундаментальных исследований. В ее основу должны быть положены четкие, понятные критерии. Она призвана интегрировать работу, проводимую в государственных академиях наук, высших учебных заведениях, государственных научных центрах. И должна быть нацелена на исследования, которые позволят России выйти на уровень стран, самых передовых в научном и технологическом плане.

Обращаю внимание: такая программа не просто должна быть рассмотрена и утверждена в Правительстве — нужно создать механизм ее публичного, открытого аудита, то есть исполнители программы должны регулярно отчитываться не только перед чиновниками за полученные деньги, а перед научным сообществом, перед российскими гражданами. При этом к экспертизе следует, конечно, привлекать и авторитетных международных специалистов.

Единая интегрированная программа фундаментальных исследований позволит более эф-

ективно использовать государственные средства, выделяемые на исследования и разработки, избежать дублирования тематик, устраниить ведомственные барьеры и различные нестыковки. В результате мы сможем сформировать научные коллективы, состоящие из ученых, работающих в различных областях науки. А мы знаем сегодня, что как раз на стыке и происходят наиболее интересные открытия.

Считаю, что задача государства и Российской академии наук — настойчиво искать прорывные разработки, стимулировать здоровую конкуренцию в сфере научных исследований, в том числе за счет привлечения нестандартных идей, которые есть в коллективах молодых энтузиастов, в динамично развивающемся секторе высокотехнологичного, инновационного бизнеса.

Многие известные ученые обращаются в Администрацию Президента, в Правительство с предложением усилить конкурсное начало при распределении средств, выделяемых на научную деятельность, более широко использовать механизмы состязательности, финансировать прежде всего перспективные научные коллективы и разработки. Безусловно, я с таким подходом согласен. Конкурс — это действительно наиболее эффективный способ распределения финансовых средств. В то же время здесь есть определенные ограничения: Бюджетный кодекс, различные законодательные акты, регламентирующие расходование бюджетных средств. Я прошу Минобрнауки (нового министра), Минфин, другие заинтересованные ведомства совместно с Академией наук сформулировать свои предложения, провести инвентаризацию законодательства и убрать барьеры для внедрения современных подходов в сфере финансирования научной деятельности. Например, мы видим, как хорошо зарекомендовала себя грантовая модель. Поэтому намерены существенно — хочу это подчеркнуть, существенно — увеличить ресурсное наполнение государственных научных фондов, которые поддерживают перспективные научные исследования. Так, к 2018 году планируется выделять до 25 миллиардов рублей Российскому фонду фундаментальных исследований и Российскому гуманитарному научному фонду. Причем размеры грантов будут сопоставимы с теми,

которые предоставляют ученым ведущие иностранные фонды и университеты.

Естественно, отбор проектов для грантовой поддержки также должен проходить максимально открыто. И, добавлю, по более жестким правилам с участием, как и в предыдущем случае, ведущих ученых и, конечно, ваших международных коллег. Средства, полученные от фондов, должны идти на финансирование наиболее значимых научных исследований, напрямую влияющих на развитие фундаментальной науки.

Также как минимум до 2015 года мы продлим программу по привлечению лучших специалистов в наши университеты вне зависимости от их гражданства или места работы. Более того, распространим ее на академические институты, государственные научные центры. Это позволит им укрепить свой кадровый потенциал, запустить новые исследовательские проекты по приоритетным направлениям.

Отмечу, что эта программа уже эффективно работает. Я бывал в некоторых из таких лабораторий, смотрел, как трудятся ваши коллеги. Что считаю важным подчеркнуть: основные получатели грантов (это примерно 70 процентов) — именно наши соотечественники, либо работающие здесь, либо переехавшие на другое место работы в другие страны, но возвращающиеся и работающие у нас не менее трех — шести месяцев в году. А многие сидят здесь уже безвылазно, передают свои знания и студентам, и университетам. И, что очень важно, занимаются выведением на рынок результатов своих исследований, причем как на наш рынок, так и на зарубежный. По сути, мы не на словах, а на деле, не в формате просто призывов, каких-то ограничений, запретов, а путем, скажем так, экономического стимулирования заинтересованности собираем наш национальный интеллектуальный потенциал.

Мы также рассчитываем, что к 2020 году не менее пяти российских университетов должны войти в первую сотню ведущих мировых университетов. Правда, здесь тоже надо понять, что такое ведущие университеты. Все эти рейт-

тинги — это вещь в себе, надо еще с этим разобраться, но думаю, что специалистам, которые находятся в этом зале, нетрудно будет сделать вывод о том, на каком уровне находится тот или иной университет России. Убежден, решение такой задачи возможно лишь при самом тесном взаимодействии высшей школы и академических институтов, Российской академии наук.

Нам следует в полной мере задействовать мощный образовательный, наставнический потенциал российских ученых, увеличить количество базовых кафедр, развивать систему научно-образовательных центров, работающих в институтах Академии наук. И я очень прошу обратить внимание на это направление, считаю его важным. Тем более что уже есть успешный опыт партнерства науки и образования. В качестве примеров приведу Московский государственный университет, Академический университет в Санкт-Петербурге, Математический институт имени Стеклова. Кстати говоря, сегодня на нашем мероприятии присутствуют члены команды Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, которые победили на студенческом чемпионате мира по программированию. Так что мы побеждаем не только в хоккее, но и в таких дисциплинах. Я их сердечно поздравляю с этим достижением.

Блестящий успех нашей студенческой команды — это яркий пример эффективной интеграции науки и образования, качественной подготовки творческой, мыслящей молодежи, которая обязательно должна быть востребована во всех сферах жизни страны и, конечно, в российской науке, в том числе и фундаментальной.

Уважаемые коллеги! В заключение хотел бы еще раз поблагодарить весь коллектив Академии наук за тот огромный вклад, который вы вносите в развитие страны, за продолжение исторических традиций искреннего служения Отечеству и своему народу, о которых говорил Петр Великий, создавая Академию наук.

*Спасибо вам большое за внимание.*



УДК 629.78

А.Б. Железняков, В.В. Кораблёв

## ОПЫТ ОСВОЕНИЯ КОСМОСА КИТАЙСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКОЙ

КНР, успешно реализуя свои космические планы, превратилась в одну из ведущих космических держав. Однако информация о китайских космических программах и этапах их реализации выглядит значительно скромнее по сравнению с подобной информацией о двух других лидерах освоения космоса — России и США.

Учеными Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ) был подготовлен ряд статей [1], посвященных проблемам освоения космоса. В предлагаемой работе кратко проанализированы основные шаги космической программы КНР — от ее старта в 1956 году до планов на ближайшие десятилетия.

### Немного истории

Заметим, что именно Китай является родиной ракетной техники. Ракеты появились в Поднебесной около двух тысяч лет тому назад — сначала как средство развлечения (праздничные фейерверки), а вскоре и как система вооружения. Первые сведения о боевом использовании китайцами пороховых ракет относятся к 960 году, когда с их помощью были остановлены орды монголов-завоевателей. А уже в 1232 году в Китае были созданы ракетные установки залпового огня и ракеты с дальностью полета до 9 километров.

Приблизительно 1500 годом датируется легенда о попытке китайского мандарина Ван Гу отправиться в космос. Для этого он закрепил на своем троне 47 пороховых ракет и 47 его слуг одновременно поднесли факелы к их запалам. Как гласит легенда, вслед за этим последовал мощный взрыв. Когда дым рассеялся, очевидцы не увидели на «стартовой площадке» ни Ван Гу, ни его аппарата, ни его слуг.

Конечно, Ван Гу не мог даже теоретически достигнуть космического пространства. Вероятнее всего, он стал одной из первых «жертв» ракетостроения. Но такая попытка, если, конечно, она была предпринята, или лишь намерение совершить такой полет говорят о высочайшем уровне развития в Китае ракетной техники.

В эти же годы китайские ракетные технологии получили широкое распространение во многих странах Европы и Азии. За пределами Китая происходило их бурное развитие — ракеты становились мощнее, увеличивалась высота и дальность их полета. Расширился круг задач, которые решались с их помощью — они стали использоваться не только как оружие, но и как средство для решения научных и прикладных задач.

А вот в Китае о ракетах стали постепенно забывать. Долгие годы они оставались на своей родине на том же уровне развития, как и во времена Ван Гу, или даже ниже.

Все изменилось в середине XX века. Вновь к работам по ракетной тематике в Китае вернулись только в 1956 году. Считается, что в этом году было положено начало китайской космической программы. В то время СССР и КНР связывали тесные дружеские отношения, и в рамках двухсторонних межправительственных соглашений из Советского Союза Китаю были переданы некоторые образцы ракетной техники (в том числе и баллистические ракеты средней дальности Р-2), а также документация к ним. Многие китайские специалисты прошли курс обучения азам ракетостроения в нашей стране. В 1960 году состоялся успешный запуск первой китайской баллистической ракеты DF-1, которая практически была копией советской ракеты Р-2.



Работы по ракетной тематике в Китае возглавил Цянь Сюэсэнь. Он долгие годы проживал в США, участвовал в создании американских межконтинентальных баллистических ракет, но во времена «охоты на ведьм» был отстранен от работы и вынужден вернуться на родину. Именно его сегодня называют «отцом китайской космонавтики» за тот вклад, который он внес в становление Китая как космической державы. Цянь Сюэсэнь скончался в Пекине 31 октября 2009 года в возрасте 98 лет.

Осложнение отношений между нашими странами в начале 1960-х годов привело к прекращению советско-китайского «ракетного сотрудничества», но ускорило самостоятельные разработки ракетной и космической техники в Китае. Эти работы в то время в значительной мере носили военный характер. Первым, основанным в октябре 1956 года, научно-исследовательским центром, связанным с космической отраслью, был Пятый НИИ Минобороны. Однако начиная с 1968 года спектр решаемых задач значительно расширился. В КНР был создан Исследовательский институт космической медицины и инженерии, заработали программы подготовки тайконавтов (китайских космонавтов), правительство страны уделяло большое внимание развитию космических технологий, в том числе для мирного использования космоса. Результатом этого стал запуск 24 апреля 1970 года спутника «Дунфан Хун-1». И пусть этот простейший космический аппарат транслировал с орбиты на Землю лишь одну единственную

мелодию «Алеет восток», но он позволил Китаю стать пятой в истории страной, обладающей технологией запуска спутника.

В 1970-х годах происходило становление китайской космонавтики. Темпы были не слишком высокими — в период с 1970 по 1979 год на орбиту было выведено восемь китайских спутников. Но в эти годы удалось заложить основу для дальнейшего развития космических средств, необходимых для решения прикладных задач (связь, навигация, метеорология, дистанционное зондирование Земли), а также задач национальной обороны (разведывательные спутники). Уже тогда рассматривались планы по осуществлению пилотируемых полетов в космос.

В следующее десятилетие (1980-е годы) началось развертывание в космическом пространстве спутниковых группировок народнохозяйственного назначения. В этот же период удалось решить такие важные задачи, как возвращение космического аппарата на Землю и вывод космических аппаратов на геостационарную орбиту. В период с 1980 по 1989 год в Китае было выполнено 15 успешных запусков ракет космического назначения. Но все же по сравнению с космическими достижениями СССР и США успехи КНР выглядели скромно.

Последнее десятилетие XX века характеризуется бурным развитием китайской экономики. Темпы ее роста, особенно на фоне геополитических изменений в Европе, более чем впечатляют. Это позволило Китаю на рубеже тысячелетий стать одной из ведущих мировых держав.

Не осталась в стороне от этого бурного развития и китайская космонавтика. Возросло количество китайских космических аппаратов, как запускаемых, так и функционирующих на орбите, увеличилась продолжительность их работы в космосе, расширился круг задач, ими решаемых. В начале 1990-х годов Китай вышел на мировой космический рынок, предоставив всем заинтересованным странам и организациям услуги по запуску спутников, а также по их разработке и изготовлению. Существенно расширился спектр услуг, которые стали предоставляться наземным потребителям.

В 1990-е годы началась реализация программы подготовки и осуществления пилотируемого полета в космос; работы по пилотируемой тематике были развернуты широким фронтом.



Рис. 1. Отец китайской космонавтики  
Цянь Сюэсэнь



Надо отметить, что большая роль в том, что Китаю удалось отправить человека в космос, принадлежит России. К концу прошлого века восстановились добрососедские отношения двух стран и возобновилось сотрудничество в ракетной и космической сферах. Как и за сорок лет до этого, китайские специалисты стали вновь приезжать в нашу страну и учиться тому, в чем еще не были сильны.

Одновременно китайские компании стали активно закупать в нашей стране оборудование, которое могло быть использовано для отправки человека в космос и для его благополучного возвращения на Землю. В 1994 году и последующие годы Россия продала КНР ряд космических технологий, используемых для производства знаменитых космических кораблей «Союз». В частности, были закуплены спускаемый аппарат российского корабля «Союз», стыковочный узел, гамма-лучевой высотомер, скафандр, система жизнеобеспечения и ряд других агрегатов корабля. Несмотря на то, что документация при этом не поставлялась (или поставлялась в сильно сокращенном виде), китайские специалисты смогли использовать закупленную технику для разработки соответствующих аналогов.

Но, и это надо признать, разработка и изготовление аналогов узлов и агрегатов стало лишь первым шагом, который сделали китайские специалисты на пути создания своего космического корабля «Шенъчжоу-1» («Небесная ладья»). Вскоре они смогли сделать очередной шаг и на основе этих аналогов разработали собственные технические средства, которые не уступали, а часто и превосходили по техническим характеристикам те, которые они приобрели в России. Например, китайские корабли имеют в своем составе орбитальный отсек, который после завершения пилотируемой миссии способен около шести месяцев находиться в автономном космическом полете и обеспечивать выполнение программы научных и технических экспериментов.

Первый полет корабля «Шенъчжоу-1» в беспилотном варианте состоялся в ноябре 1999 года; он был приурочен к 50-летию КНР и прошел успешно. Корабль пробыл в космосе 21 час. После приземления спускаемого аппарата даже сторонним наблюдателям стало ясно, что Китай близок к тому, чтобы отправить человека в космос. Предполагали, что это случится еще до кон-



Рис. 2. Первый тайконавт Ян Лиэй

ца XX века. Однако в Китае решили «не торопить события» и отложить это эпохальное событие на начало следующего тысячелетия.

Совершение пилотируемого полета в космос предусматривал пятилетний план в области освоения космического пространства (2001–2005 годы), сформулированный в Китае в самом начале XXI века. Кроме того, планировалось в течение этих лет разработать новое поколение телекоммуникационных и метеорологических космических аппаратов, создать новые типы носителей семейства «Великий поход», начать развертывание навигационной системы «Бейдоу», а также обосновать необходимость изучения Луны и других планет. В эти же годы впервые прозвучали слова о намерении Китая в обозримом будущем (ориентировочно в 2020-х годах) высадить своих космонавтов на поверхность естественного спутника Земли.

Надо отметить, что все эти планы были с успехом воплощены в жизнь. И самым главным достижением, конечно, стал первый полет в космос китайского космонавта.

Но перед тем, как отправить человека на околоземную орбиту, были совершены еще три полета кораблей «Шенъчжоу» в беспилотных вариантах. В 2001 году на борту «Шенъчжоу» в космос отправились собака, другие животные,



растения и микроорганизмы. В последующих полетах отправлялись манекены космонавтов с целью отработки очередных элементов будущей пилотируемой миссии, которая состоялась 15 октября 2003 года. Пилотировавший корабль «Шенъчжоу-5» Ян Ливэй стал первым тайконавтом. Он провел на орбите 21 час 22 минуты, совершив 14 витков вокруг Земли. Китай стал третьей страной, отправившей человека в космос и обеспечившей возвращение его на Землю.

В 2005 году был совершен второй пилотируемый полет. На этот раз корабль пилотировал экипаж из двух космонавтов. Их полет продолжался почти пять дней. В ходе полета «Шенъчжоу-6» были испытаны системы ручного управления кораблем, ресурсные испытания системы жизнеобеспечения, а после его завершения была апробирована методика восстановления космонавтов после относительно длительного космического полета.

Сейчас лишь две страны запускают людей в космос — Россия и Китай. Обладающие такой возможностью США на время покинули этот сектор космической деятельности.

В течение 2001–2005 годов решались и другие задачи, ставившиеся перед китайской космонавтикой. И это удалось сделать несмотря на то, что основные усилия специалистов в это время были направлены на подготовку и осуществление пилотируемой миссии.



Рис. 3. Спускаемый модуль пилотируемого Ян Ливэем корабля «Шенъчжоу-5» на Земле

Но по-настоящему «звездный час» наступил для китайской космонавтики в 2006–2011 годах. Китайским специалистам удалось в этот период потеснить на космических орбитах своих конкурентов. Такие космические державы, как Япония, Индия, Иран, Израиль, Европейский союз, остались далеко позади, а «законодатели космической моды» Россия и США были вынуждены признать появление на космических трассах третьего полноправного игрока.

Именно эта пятилетка и сформировала образ современного «космического Китая».

### Китайская космонавтика сегодня

За последние пять лет китайская космонавтика достигла многоного. Можно смело утверждать, что темпы ее развития превосходят темпы развития китайской экономики. Это неудивительно — космонавтика всегда находится на острие научно-технического прогресса.

В области пилотируемой космонавтики знаковыми стали два события: первый выход в открытый космос, совершенный Чжай Чжиганом 27 сентября 2008 года (покинув корабль с флагом КНР в руке, он находился за бортом 25 минут\*) и запуск лабораторного модуля «Тяньгун-1» («Небесный дворец») с последующей его стыковкой с беспилотным кораблем «Шенъчжоу-8» осенью 2011 года. Это позволило протестировать технику маневрирования при сближении с космической станцией и процедуру самой стыковки. Тем самым была заложена основа для развертывания на околоземной орбите китайской космической станции.

В эти же годы был произведен новый набор в отряд китайских космонавтов. Впервые в его состав вошли женщины.

В 2007 году стартовала китайская лунная программа. Состоялись полеты к ночному светилу двух межпланетных станций — «Чанъэ-1» и «Чанъэ-2». Первая из них провела на окололунной орбите 16 месяцев, завершив свою миссию в марте 2009 года. В результате исследований, проведенных «Чанъэ-1», была составлена подробная трехмерная карта Луны. С помощью

\* Космонавт Чжай Чжиган был облачен в скафандр «Фэйтянь», разработанный в КНР. Страховавший его космонавт Лю Бомин был одет в российский скафандр «Орлан М» и находился внутри разгерметизированного грузового отсека корабля.



«Чанъэ-2» были выбраны места будущих посадок лунных зондов.

В ходе миссии «Чанъэ-2» китайскими специалистами был продемонстрирован красивый инновационный подход к решению важной задачи. Завершив исследования на сelenоцентрической орбите, космический аппарат не упал на поверхность Луны, как его предшественник, а был направлен в точку либрации L2 для продолжения своей работы. Обращаясь по орбите высотой сто километров над поверхностью Луны, он исследует ее поверхность с целью выбора места для посадки лунного зонда «Чанъэ-3». Его запуск запланирован на 2013 год. «Чанъэ-3» доставит на Луну луноход, который будет использовать источник энергии на радиоактивных изотопах. Планируется отправка тайконавтов на Луну в 2017 году, их подготовка уже ведется.

Следует отметить, что университет Цинхуа, с которым СПбГПУ связывают многолетние не только научные, но и дружеские отношения, активно участвует в лунной программе КНР. Так, в 2010 году Цинхуа успешно завершил цикл работ по разработке новых технологий для беспилотных лунных модулей. Профессор Лу Джанхуа, вице-председатель Школы космоса университета Цинхуа, получил премию правительства за выдающийся вклад в развитие космонавтики.

Предполагалось, что в 2011 году Китай приступит к изучению Марса. Для этого на борту российской межпланетной станции «Фобос-Грунт» был установлен китайский микроспутник «Инхо-1», который должен был отделиться от основного аппарата после прибытия станции в окрестности «красной планеты». К сожалению, миссия «Фобос-Грунта» закончилась провалом, и начало китайских исследований Марса пока откладывается. Вероятнее всего, Китай будет вести эти исследования самостоятельно, не полагаясь на третьи страны.

Планируется запуск исследовательского зонда к Марсу в конце 2013 года. В том случае, если все работы не будут выполнены к этому времени, запуск будет осуществлен в 2016 году (в это время орбиты Земли и Марса будут находиться на минимальном расстоянии друг от друга). К 2011 году Китай занял второе место в мире по интенсивности своей пусковой космической деятельности. За год было произведено 19 пусков ракет-носителей, из которых 18 были успешными



Рис. 4. Чжай Чжиган в открытом космосе

и один — аварийным. По этому показателю Китай уверенно занял второе место в мире, опередив США и уступая лишь России.

В конце 2011 года была введена в тестовую эксплуатацию навигационная система «Бейдоу», создание которой завершится в 2020 году. Важность этого события трудно переоценить. Ведь речь идет о возможности получать информацию от спутников орбитальной группировки в Китае и сопредельных стран и преодолеть зависимость КНР от системы GPS — доминирующей сети спутниковой навигации в мире. По своим параметрам «Бейдоу» мало в чем уступает американской системе GPS и российской ГЛОНАСС, но обходится существенно дешевле потребителям. Если такие цены сохранятся и в будущем, то «Бейдоу» может составить существенную конкуренцию другим глобальным навигационным системам.

Как американский и российский аналоги, система «Бейдоу» имеет двойное назначение. Она предназначена для удовлетворения в первую очередь потребностей Народной освободительной армии Китая (НОАК), а во вторую — нужд китайского народного хозяйства. Возможность коммерческого использования китайской навигационной системы стоит лишь на третьем месте, но тем не менее предполагает получение солидной прибыли.

В минувшие пять лет в Китае было завершено формирование национальной системы спутниковой связи. На геостационарной орбите успешно функционируют космические аппараты собственного изготовления.



Рис. 5. Запуск ракеты РН CZ-2F с беспилотным кораблем «Шеньчжоу-8»

Удовлетворение нужд китайской армии и народного хозяйства в спутниках связи позволило китайским специалистам приступить к их реализации на внешнем рынке. В последние годы телекоммуникационные спутники китайского производства были запущены в интересах Венесуэлы, Пакистана и Нигерии. В планах — запуск телекоммуникационного спутника для Лаоса.

В области метеорологии Китай сейчас эксплуатирует спутники второго поколения «Фэньюнь-3А». Космический аппарат оснащен десятком современных приборов дистанционного зондирования, в том числе пятиканальным устройством получения мультиспектральных изображений разрешением 250 метров. Он призван сыграть важную роль в области прогнози-

рования климата, контроля экологической обстановки и мониторинга стихийных бедствий.

Большое внимание в 2006–2011 годах в Китае было уделено созданию и запуску спутников дистанционного зондирования Земли как гражданского, так и военного назначения. На орбите уже развернута целая сеть таких космических аппаратов. Армия Китая имеет в своем распоряжении оптические спутники «Цзыюань» и радиолокационные «Яогань». Для прочих потребителей были созданы их гражданские аналоги, а также разработан китайско-бразильский спутник семейства CBERS.

К спутникам дистанционного зондирования Земли относятся и океанографические спутники типа «Хайянь», а также малые космические аппараты мониторинга окружающей среды и контроля катастроф «Хуаньцзин». Причем все эти аппараты не единичны, а являются составной частью единой системы наблюдения за поверхностью Земли. В КНР развернуто полномасштабное строительство системы наблюдения Земли с высоким разрешением. Эта система один из 16 специальных проектов научно-технического значения, входящих в китайскую программу развития науки и техники на период с 2006 до 2020 гг.

Ведутся в Китае и работы прикладного назначения. Для проведения научных исследований и экспериментов используются аппараты типа «Шицзянь», регулярно выводимые на околоземную орбиту в последние годы.

Несмотря на мирную направленность космических исследований, в Китае не забывают и о нуждах национальной обороны. Помимо данных, получаемых от навигационных, связных, метеорологических и разведывательных спутников, в Китае разработан и испытан ряд систем вооружения, которые могут быть применены и в космическом пространстве. Еще в январе 2007 года НОАК сбила один из своих метеорологических спутников ракетой, создав большую массу космического мусора. В последние годы были проведены натурные испытания системы противоракетной обороны и противоспутниковой системы. Китайское правительство не намерено размещать эти системы на околоземной орбите, но имеет потенциальную возможность их развертывания при необходимости.

С расширением масштабов космической деятельности КНР развивает нормы и правила по-

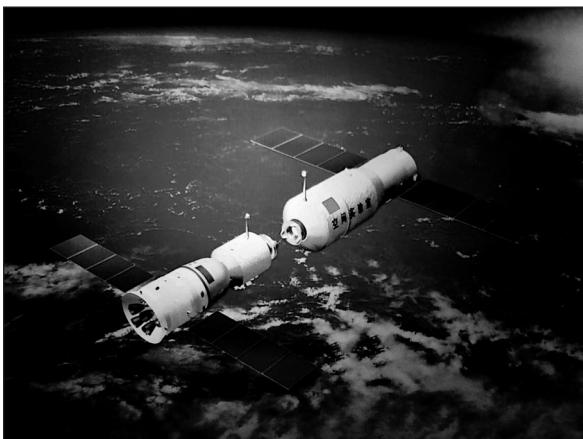


Рис. 6. Стыковка «Шеньчжоу-8» и лабораторного модуля «Тяньгун-1»



ведения в космосе — космическое право. К настоящему времени еще не выработано единое космическое законодательство, но работы в этом направлении ведутся широким фронтом (регистрация космических объектов, лицензирование космической деятельности и экспорта космической продукции, борьба с космическим мусором, защита интеллектуальной собственности).

### Перспективы китайской космонавтики

Столь же впечатляющими, как нынешнее состояние китайской космонавтики, выглядят и китайские планы на будущее. Они охватывают все сферы космической деятельности: пилотируемую космонавтику, изучение Луны и планет, создание орбитальных группировок спутников различного назначения. Свое отражение эти планы нашли в программе освоения космического пространства на ближайшие пять лет (2012–2016 годы), которая была одобрена (и, следовательно, будет профинансирована) правительством Китайской Народной Республики, а также в набросках программы на перспективу до 2030 года.

Правительство КНР не приводит данные о затратах на исследование космоса. По некоторым оценкам лишь проект изучения Луны обойдется приблизительно в 5 млрд долларов; при этом часть расходов не включена в статью «Космос», а финансируется НОАК. Затраты КНР на освоение космоса оцениваются как одни из самых больших в мире.

В области пилотируемой космонавтики предполагается продолжить работы по созданию орбитальной космической станции. Для этого уже в 2012 году должен быть запущен космический корабль «Шенъчжоу-9» с тремя космонавтами на борту. Им предстоит осуществить стыковку с находящимся в космосе лабораторным модулем «Тяньгун-1» и в течение 20 суток проработать на его борту. Возможно, в этом полете примет участие первая китаянка, уже завершившая подготовку к космическому полету.\*

\* Запуск «Шенъчжоу-9» с космонавтами Цзин Хайпэном, Лю Ваном и первой китаянкой-космонавтом Лю Ян состоялся 16 июня 2012 г. Спустя двое суток корабль успешно состыковался с орбитальным модулем «Тяньгун-1». 33-летняя Лю Ян замужем, что было одним из требований при зачислении в отряд космонавтов, воспитывает сына.

Еще один пилотируемый полет к модулю «Тяньгун-1» запланирован на конец 2013-го — начало 2014 года. Не исключено, что в этой миссии примет участие и еще один космический аппарат — беспилотный «Шенъчжоу-11» или грузовой транспортный корабль, который в настоящее время разрабатывается для снабжения орбитальной станции.

В 2015–2016 годах предполагается запуск модулей «Тяньгун-2» и «Тяньгун-3», которые, сстыковавшись, позволят работать на борту этой экспериментальной станции экипажу из трех космонавтов. Запланированы полеты к этой «связке» пилотируемых и беспилотных грузовых и транспортных кораблей.

Завершить создание орбитальной станции Китай намерен к 2020 году. Предполагается, что к тому времени у китайцев появится возможность обеспечить регулярную смену экипажей на ее борту. Не исключено, что к тому моменту китайская станция станет единственной внеземной базой, обеспечивающей постоянное присутствие человека в космосе. По имеющимся на данный момент планам к 2020 году Международная космическая станция (МКС), решая аналогичную задачу, должна быть сведена с орбиты. Особо отметим, что в проекте МКС помимо РФ и США участвует еще 21 страна (КНР не участвует). Таким образом, Китай пытается делать в одиночку то, что 23 технологически развитые страны делают совместно.

В перспективе предполагается создать и другие пилотируемые космические системы, в том числе и многоразовые. Они должны быть значительно большими по размеру, чем корабли серии «Шенъчжоу», обладать большими функциональными возможностями, чем современные корабли, обеспечить решение задач, которые намечены в Китае на 2020–2030-е годы. Но это дело относительно отдаленного будущего — пока новые пилотируемые корабли существуют только в набросках.

В области межпланетных полетов Китай пока имеет только трехэтапную программу лунных исследований, первый этап которой был практически завершен в ходе полета станции «Чанъэ-2».

В 2012–2016 годах Китай намерен выполнить второй этап своей лунной программы. При этом предполагается отработать технологию мягкой

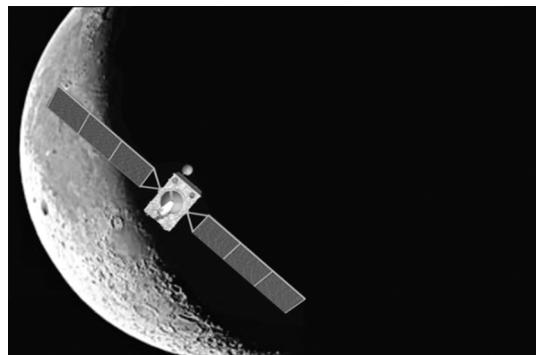


Рис. 7. Зонд «Чанъэ-2» над Луной

посадки космического аппарата на поверхность Луны, разработать типовую платформу для доставки на лунную поверхность различного оборудования, а также создать мобильные средства для движения по поверхности естественного спутника нашей планеты.

Центральным событием второго этапа должна стать доставка на лунную поверхность лунохода. Предполагается, что он проедет на поверхности около 10 километров и будет изучать строение грунта, камней и следов лунной атмосферы.

А всего в рамках второго этапа предполагается осуществить две-три мягкие посадки с целью сбора основных данных для создания научной станции на поверхности Луны.

На 2017–2020 годы намечено выполнение третьего этапа китайской лунной программы. Запланирована установка на посадочный модуль бурового оборудования, которое позволит взять образцы грунта с разной глубины и с помощью миниатюрного возвращаемого аппарата доставить на Землю. Общий вес образцов должен составить около 1 килограмма.

Этот шаг китайские специалисты считают крайне важным для выбора будущего места размещения лунной базы, создание которой возможно в конце 2020-х годов. При этом планируется решать не только научные задачи по изучению Луны и окололунного пространства, но и задачи по эксплуатации лунных недр. В частности, китайских специалистов интересуют залежи воды в виде льда в подповерхностном слое лунного грунта, месторождения железа, а также — как отдаленная перспектива — возмож-

ность добычи на Луне гелия-3, используемого в качестве термоядерного топлива.

Но о том, как в дальнейшем будет развиваться китайская лунная программа, пока можно только гадать. Об отправке космонавтов на Луну в настоящее время речь не идет. Хотя на ближайшую пятилетку запланирована разработка обоснования необходимости совершения такой миссии. Вероятно, решение о пилотируемых лунных экспедициях будет принято по результатам выполнения второго этапа программы. Если запланированные результаты удастся достичнуть, то полет китайских космонавтов на Луну будет вполне реален и может состояться до 2020 года, а начало строительства на Луне добывающих промышленных модулей произойдет в 2025 году.

Исследование Луны — лишь первый шаг Китая по изучению и освоению дальнего космоса. В планах — куда более масштабные проекты по изучению Марса, Солнца, планет и других небесных тел Солнечной системы. Более или менее четкие планы пока существуют только в отношении Марса — в ближайшее десятилетие к Красной планете должен стартовать китайский зонд. В отношении других «потенциальных» целей пока существует только задача разработки обоснования необходимости их изучения. Однако логика развития мировой и, в частности, китайской космонавтики позволяет говорить, что в 2020-х годах Китай запустит ряд космических аппаратов для исследования и других объектов.

В ближайшие пять лет запланировано поддержание в рабочем состоянии и расширение орбитальных группировок навигационных, телекоммуникационных, метеорологических и зондирующих спутников. Например, навигационная система «Бейдоу» должна быть развернута в полном объеме, а ее коммерческая составляющая к 2015 году должна принести прибыль в размере 225 миллиардов юаней (около 25 миллиардов долларов).

Большое внимание предполагается уделить разработке новых метеоспутников. Уже утвержден проект спутников «Фэньюнь» («Ветер и облако») третьего поколения. А первый космический аппарат данного типа должен быть запущен в 2013 году. Всего до 2020 года предполагается запустить 12 аппаратов второго поколения



и шесть — третьего поколения. По замыслу китайских конструкторов, это позволит удовлетворить все национальные нужды, а также широко распространять метеоданные на коммерческой основе. Китайские специалисты утверждают, что ряд функций, которыми снабжена система «Фэньюнь-3», недоступны американским и европейским системам подобного типа.

Прогнозируется активное «вторжение» китайских спутниковых технологий на рынки третьих стран. Предполагается, что более всего спросом будет пользоваться наземное оборудование, а также спутники связи и спутники дистанционного зондирования Земли.

Для решения задач прикладного характера Китай намерен сохранить достигнутую к 2011 году интенсивность космических запусков. В период 2012–2016 годов запланирован запуск 100 ракет космического назначения, в том числе в 2012 году должны запустить двадцать одну ракету.

Для обеспечения столь интенсивной по нынешним меркам пусковой деятельности в Китае запланирована разработка новых ракет-носителей — «Великий поход-5», «Великий поход-6» и «Великий поход-7». По сравнению с ныне эксплуатируемыми ракетами они будут не только

обладать большей грузоподъемностью, но и использовать более совершенные двигатели, системы управления полетом и другие служебные системы.

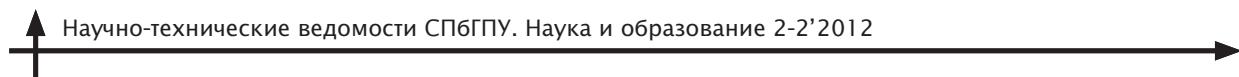
Для обеспечения нужд китайской космонавтики в настоящее время используется три центра запусков спутников: Тайюань, Сичан и Цзюцюань. Расширение перечня задач потребовало создания еще одной стартовой площадки. На острове Хайнань на юге страны ведется сооружение стартовых площадок, технических позиций и систем коммуникаций. Начало функционирования нового космодрома должно начаться в ближайшее время. Предполагается, что с него будут стартовать носители, предназначенные для вывода грузов на геостационарную орбиту.

Учитывая, что предыдущие космические планы Китая были воплощены в жизнь, можно надеяться, что и очередные программы будут столь же успешно реализованы.

В статье использованы материалы источников [2–4]. Авторы благодарны президенту СПбГПУ академику РАН Ю.С. Васильеву и генеральному конструктору РКК «Энергия» им. С.П. Королева члену-корреспонденту РАН В.А. Лопоте за инициирование настоящей работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. У истоков космической эры [Текст] // Под ред. Ю.С. Васильева.— СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2011.
2. Салахутдинов, Г.М. Космонавтика в Китае [Текст] / Г.М. Салахутдинов, Т.Н. Желнина // Земля и Вселенная.— 1989. № 6.
3. Борзенко, В. Космонавтика Китая [Текст] / В. Борзенко // Аэрокосмическое обозрение.— 2003, № 1.
4. Белая книга «Деятельность Китая в космосе в 2011 году» (China's Space Activities in 2011) [Текст] // China-press, 2011.



УДК 621.039

А.Я. Благовещенский

## НЕКОТОРЫЕ ВЕХИ СОЗДАНИЯ И РАЗВИТИЯ КОРАБЕЛЬНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ (ВОСПОМИНАНИЯ, ВПЕЧАТЛЕНИЯ, РАЗМЫШЛЕНИЯ)

После окончания в марте 1954 года с золотой медалью паросилового факультета Ленинградского высшего военно-морского инженерного училища в г. Пушкин я в составе группы из 30 выпускников был направлен на годичные курсы по противоатомной защите в Военно-морскую академию. Тогда это направление было для ВМФ особо актуальным. Оказалось, что как раз в это время формировались экипажи двух первых атомных подводных лодок (ПЛА). Сам факт начала создания в СССР атомного подводного флота был строго засекречен. Шесть человек из нашей группы (и меня, в том числе) уже в сентябре 1954 года назначили в экипаж ПЛА командирами групп дистанционного управления главной энергетической установкой (ГЭУ) и отправили на обучение в Обнинск, где в этом же 1954 году была пущена первая в мире атомная электростанция. Учебного центра ВМФ там еще не было. Мы проходили теоретическую и экспериментальную подготовку (работали на физ-сборках) в Физико-энергетическом институте (который в то время назывался «Лаборатория В» МВД СССР, а ныне это ФЭИ имени А.И. Лейпунского) и практическую подготовку на АЭС сначала в качестве стажеров, а затем — инженеров, допущенных к самостоятельному управлению ядерным реактором станции. В целях конспирации мы были переодеты в гражданскую одежду. Нет необходимости подробно останавливаться на этом очень ярком периоде нашего становления, он хорошо описан в книге известных подводников-атомщиков: контр-адмиралов Л.Г. Осипенко, Л.М. Жильцова, Н.Г. Мормуля «Атомная подводная эпопея» (1994 г.) и отражен в моих воспоминаниях в книге В.М. Шмелёва «Первопроходцы атомной энергетики» (2004 г.).

Головная (вторая) ПЛА проекта 627 А, в экипаже которой я состоял, была заложена в августе 1956-го в цехе № 42 на Северном машиностроительном предприятии (СМП) в Северодвинске.

В 1956 году я был переведен из экипажа в Ленинград в 1-й Центральный научно-исследовательский институт военного кораблестроения (1 ЦНИИ МО), который в тот период активно подключался к атомному подводному кораблестроению.

Моим учителем, наставником в работе и творческой деятельности стал Иван Дмитриевич Дорофеев, первый начальник отдела корабельных АЭУ, в дальнейшем начальник управления корабельной энергетики Института, крупный инженер, военный моряк, прошедший на кораблях Великую Отечественную войну. Пройдя стажировку в Обнинске, где мы не только самостоятельно работали на АЭС, но и участвовали в монтаже наземного прототипа атомной энергетической установки одного борта ПЛА первого поколения, я был достаточно подготовлен к новой деятельности. В тот период ни училище, ни академия такую подготовку дать не могли. И.Д. Дорофеев доверял молодым офицерам очень серьезную работу и решение важных организационно-технических вопросов с промышленностью, что позволяло не чувствовать себя в большом деле «пешкой», от которой мало что зависит. Например, мне, когда я был в звании всего лишь капитана 3-го ранга, было поручено выступить на расширенном НТС с участием академиков А.П. Александрова, Н.А. Доллежаля, Г.И. Капырина, главных конструкторов и руководителей предприятий с докладом-заключением по оценке конкурсных проектов реакторных установок для подводных лодок 3-го поколения,



за проектирование которой боролись ведущие предприятия страны: НИКИЭТ (Москва), ОКБМ (г. Горький), ЦНИИ им. А.Н. Крылова, КБ Ижорского завода, СКБК Балтийского завода (Ленинград). На этом НТС победила сформированная нами позиция и был принят проект блочной установки ОК-650Б, разработанный ОКБМ (Начальник и Главный конструктор — И.И. Африкантов) и в наибольшей степени удовлетворяющий требованиям ВМФ. Такое доверие окрыляло. Оглядываясь на прошлое, я испытываю глубокую благодарность Учителю за большую профессиональную и жизненную школу, которую прошел под его руководством.

1 ЦНИИ МО в области создания ядерных энергетических установок занимался научным обоснованием требований ВМФ к проектированию, их реализацией при создании новых проектов ПЛА в ходе научно-технического сопровождения на предприятиях промышленности, отработкой на испытаниях в натурных условиях. Это очень важный аспект деятельности, так как от характеристик ЯЭУ в значительной степени зависит боевая эффективность корабля в целом. За огромный вклад в эту работу И.Д. Дорофеева — крупного ученого и организатора, доктора технических наук, лауреата Ленинской премии, контр-адмирала — друзья-сослуживцы называли «русским Риккером» (Риккер — американский адмирал, главный идеолог атомного подводного кораблестроения). Академик Анатолий Петрович Александров, научный руководитель проблемы корабельной ядерной энергетики, относился к Ивану Дмитриевичу с максимальным уважением как к главному авторитету в этой области среди руководящего состава военного кораблестроения и всегда учитывал его мнение при принятии решений. «Правой рукой» А.П. Александрова в научном руководстве проблемой был Николай Сидорович Хлопкин (ныне академик РАН).

Новейшая специальная область военного кораблестроения требовала постановки и решения задач по разработке новых технологий, созданию новых специальных материалов, исследованию теплогидродинамических процессов, развитию средств автоматики, обеспечению ядерной и радиационной безопасности, снижению физических полей ПЛА, обеспечению ее скрытности, снижению шумности и др. На-

ряду с паропроизводящей реакторной установкой в общем комплексе ГЭУ ПЛА важную роль играют технические решения паротурбинной установки, которую пришлось создавать применительно к новым специфическим условиям эксплуатации.

Первая корабельная ЯЭУ (Главный конструктор реакторной установки ВМ-А — академик Н.А. Доллежаль, НИКИЭТ) создавалась при активном участии Главного конструктора ПЛА В.Н. Перегудова (ЦКБ «Малахит», в прошлом СКБ-143). Необходимо было осуществлять постоянную обратную связь между реакторщиками и корабелами. Требования к мощностным и мас-согабаритным характеристикам реакторной установки диктовались потребностями корабля, а получаемые характеристики ЯЭУ, в свою очередь, влияли на кораблестроительные элементы.

Мощности Северного машиностроительного предприятия (СМП) в Северодвинске и судостроительного завода им. Ленинского комсомола в Комсомольске-на-Амуре обеспечивали быстрое увеличение количества ПЛА различных проектов первого поколения (рис. 1). Параллельно шли доработки оборудования, требовавшие квалифицированного рассмотрения и принятия согласованных межведомственных решений. Проводились НИР по повышению надежности и безопасности эксплуатации ЯЭУ, а также испытания на ПЛА, направленные на повышение надежности, безопасности и расширение эксплуатационных возможностей ЯЭУ (освоение режимов при парциальной работе парогенераторов, работа на пониженных параметрах первого контура и др.). Внедрение новой энергетики не исключало аварийные ситуации на ПЛА, которые требовали их расследования, анализа и принятия решений. Всем известна тяжелая авария на ПЛА К-19, но в целом наша корабельная ядерная энергетика имела даже на начальном этапе ее освоения не худшие показатели надежности, чем у нашего вероятного противника. Некоторые аварии остались в памяти «ярко-мрачные» воспоминания. В частности, на одной из ПЛА первого поколения при переходе из пос. Большой Камень (Приморье) на Камчатку в подводном положении вырвало пробку теплообменника III-IV контура (с забортной водой) и затопило весь реакторный отсек. Лодка чудом не погибла и в надводном положении



Рис. 1. Атомная подводная лодка 1-го поколения, проект 627А

пришла в базу. Впечатление от «мертвого» реакторного отсека, все трубопроводы I контура которого были покрыты слоем соли, отложившейся при кипении забортной воды, было удручающим. Реакторный отсек впоследствии был заменен на новый, так как аустенитная нержавеющая сталь, несмотря на все ее достоинства, не допускает контакта с хлоридами.

Параллельно мне пришлось заниматься энергетикой ПЛА второго поколения, включая работу в ранге заместителя председателя комиссии по комплексным швартовным испытаниям головной ПЛА проекта 667А завода им. Ленинского комсомола, а также работу в комиссии государственной приемки этой ПЛА в состав ВМФ. Но самое главное — мне выпала честь с самого начала участвовать в создании реакторной установки ОК-650Б для ПЛА III поколения, осуществляя научно-техническое сопровождение проекта в ОКБМ. Руководили его разработкой И.И. Африкантов, Ф.М. Митенков, О.Б. Самойлов, Г.Ф. Носов. Сейчас ОКБМ носит имя Игоря Ивановича Африкантова.

Заслуживает внимания сравнение ЯЭУ отечественных ПЛА 1-го поколения и ПЛА США. Общим было то, что и американская ЯЭУ S-2W ПЛА «Наутилус» и отечественная ВМ-А были двухконтурными установками с водо-водяным реактором (ВВЭР). Однако наша установка была двухреакторной, обеспечивала эффективную мощность, более чем в 2,5 раза превосходящую S-2W, была оснащена газовой (а не паровой) системой компенсации давления 1-го контура, вырабатывала перегретый (а не насыщенный) пар в прямоточных парогенераторах, обладаю-

щих лучшими массогабаритными показателями и в большей степени отвечающих требованиям маневренности ЯЭУ в целом.

Испытаниям ЯЭУ ВМ-А в условиях ПЛА предшествовали испытания наземного прототипа на стенде 27/ВМ в Обнинске. По результатам этих испытаний ядерный реактор, оказавшийся, несмотря на принципиальную новизну, одним из наиболее надежных элементов всего комплекса, подвергся некоторым усовершенствованиям. Индивидуальные уплотнения каждого технологического канала в крышке реактора не оправдали себя в динамических режимах при резких изменениях температуры. Поэтому перфорированная крышка была заменена сплошной с ограниченным количеством отверстий для гильз стержней аварийной защиты и для термоконтроля. Гидравлическая система приводов стержней аварийной защиты была заменена на механическую.

Новые поколения ПЛА потребовали увеличения мощности ЯЭУ и повышения ее эффективности. Главный конструктор паропроизводящей установки И.И. Африкантов, а в дальнейшем Главный конструктор академик Ф.М. Митенков вместе со специалистами ВМФ из 1 ЦНИИ МО военного кораблестроения в качестве перспективного направления определили повышение агрегатности, блочности, компактности для исключения разветвленных трубопроводов первого контура с целью сведения к минимуму вероятности появления неплотности первого контура. В формировании концепции корабельных ЯЭУ большую роль играли также исследования ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова. Высокая



степень агрегатирования позволяет, сохраняя требование транспортабельности по железной дороге, осуществлять всю сборку и отладку паропроизводящего блока непосредственно на машиностроительном заводе-изготовителе без передачи этих ответственных технологических этапов судостроителям.

На ПЛА I поколения много неприятностей доставляли не реакторы, а парогенераторы. После интенсивных конструкторских и металловедческих поисков для недопущения протечки из первого контура во второй, приводящей к появлению по воздуху радиоактивности в турбинном отсеке, материал трубной системы парогенераторов из нержавеющей стали был заменен на титановый сплав. Очень серьезное внимание было обращено на ремонтопригодность основного оборудования в условиях ПЛА. Секционирование парогенератора позволило отключать дефектную секцию трубной части при появлении неплотностей. Была упрощена и конструктивная схема самой активной зоны: двухходовая зона была заменена на одноходовую. Более чем в 5 раз была увеличена кампания активных зон с соответствующим увеличением времени между перегрузками ядерного топлива.

Большой экономический эффект дали результаты теоретических и экспериментальных исследований динамики комплекса «реактор — паропроизводящая установка — главный турбозубчатый агрегат — винт — корабль», которые подтвердили маневренные характеристики ядерного реактора, исключающие необходимость избыточного травления пара на главный конденсатор, что привело к экономии дорогостоящего ядерного топлива.

Говоря о развитии корабельной ядерной энергетики, следует особо отметить, что параллельно с водо-водяным направлением шли интенсивные научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы по созданию реакторных установок с жидкокометаллическим теплоносителем в I контуре (ЖМТ) — сплавом «свинец—висмут». Это научное направление возглавлял академик А.И. Лейпунский, под руководством которого сформировалась научная школа в ФЭИ. Сложность проблемы на ранней стадии освоения этого направления проявилась в аварийной ситуации на опытной подводной лодке, которая была построена в единичном эк-

земпляре. Технология тяжелого теплоносителя (ТТТ) потребовала широкого размаха исследовательских работ и в итоге была успешно освоена. Были разработаны два проекта ЯЭУ с ЖМТ (разработки ОКБМ, г. Нижний Новгород, и ОКБ «Гидропресс», г. Подольск). Их массогабаритные преимущества позволили создать специальные скоростные ПЛА-истребители малого водоизмещения (Главный конструктор — ЦКБ «Малахит»), которые успешно прошли все испытания и были приняты в состав ВМФ. К сожалению, в связи с перестройкой, которая подвергла деформации и нашу военную доктрину, это направление сейчас не востребовано в отечественном атомном подводном кораблестроении. А ведь, если взглянуть на прошлое, нельзя не отметить, что наша наука и промышленность решили проблему, с которой не справились в США. После неудач с отработкой ЯЭУ с на триевым теплоносителем для ПЛА «Си-Вульф» наши «вероятные противники» («друзьями» их можно назвать лишь условно) отказались от освоения ЖМТ для ЯЭУ ПЛА.

В целом создание высоконадежной корабельной ядерной энергетики, превосходящей по основным показателям западные образцы, стало результатом сплоченной работы соответствующих коллективов науки, промышленности и ВМФ.

Большое внимание уделялось ядерной безопасности. Значительным изменениям подверглась система компенсации реактивности. Секционирование «компенсирующей решетки» с обеспечением перемещения каждой секции индивидуальным приводом системы управления защитой (СУЗ), выделение специальной секции для выхода из «иодной ямы» резко повысили живучесть реактора.

Еще одно изящное техническое решение было найдено, благодаря применению прямоточных парогенераторов. Используя эффект саморегулирования реактора (за счет отрицательного температурного коэффициента реактивности), можно изменять мощность реактора путем контролируемого изменения расхода питательной воды в парогенераторе. Задача системы СУЗ в этом случае резко упрощается и сводится лишь к поддержанию средней температуры теплоносителя 1-го контура в заданной «трубке точности».



Главным направлением моей научно-практической деятельности в 1 ЦНИИ МО было решение проблемы обеспечения надежности и безопасности корабельных ЯЭУ и расширения их эксплуатационных возможностей на базе использования естественной циркуляции теплоносителя (ЕЦТ) 1-го контура. Вместе с моим коллегой, С.М. Бором (ныне доктор технических наук профессор), мы занимались расчетным анализом условий ЕЦТ в I контуре установок I и II поколений. Несмотря на не-благоприятную геометрию I контура, была показана возможность использования ЕЦТ в качестве резервного средства циркуляции для аварийного расхолаживания реактора. Экспериментальные исследования проводились на опытных установках и в натурных условиях на ПЛА. Были обоснованы натурные испытания на ПЛА II поколения проекта 667 А (рис. 2). Они были достаточно сложными как в техническом, так и в организационном плане. Их удалось провести благодаря пониманию важности проблемы научным руководством (ИАЭ им. И.В. Курчатова), главным конструктором реакторной установки (ОКБМ), главным конструктором ПЛА (ЦКБ МТ «Рубин»), а также дружеской конструктивной помощи коллег из промышленности. Я с глубокой благодарностью вспоминаю Главного инженера ОКБМ Евгения Наумовича Черномордика, добровольно взявшего на себя изготовление уникальных термометрических зондов с открытым спаем, которые в процессе монтажа на СМП на время эксперимента устанавливались в реактор вместо одной из групп аварийной защиты. В ЦКБМТ «Рубин» была

спроектирована специальная разводка кабеля для осциллографической регистрации температуры активной зоны в исследуемых процессах.

Большую организационную помощь в согласовании со всеми инстанциями совместного решения Средмаша, Судпрома и ВМФ по проведению испытаний оказал контр-адмирал Вадим Михайлович Соловьев, заместитель начальника Главного управления кораблестроения ВМФ.

Программа испытаний предусматривала целый ряд режимов с остановкой главных циркуляционных насосов I контура (ГЦНПК) с одновременным срабатыванием аварийной защиты реактора и переходом на ЕЦТ. Будучи руководителем испытаний, я одновременно возглавлял межведомственную комиссию по их проведению. Комиссия работала в очень напряженном круглосуточном режиме, испытания необходимо было форсировать: сроки поджимали, наступал лед, ПЛА нужно было успеть перегнать из Северодвинска на базу в Гаджиево. Один из режимов мы получили на грани фола. В спешке одним из операторов была допущена оплошность. При остановке ГЦНПК расход теплоносителя резко падает до 0 за 1–1,5 секунды, а аварийная защита по ошибке была заблокирована. Ситуацию спасла высокая самозащищенность реактора, определяемая отрицательным температурным и паровым коэффициентом реактивности. Как показала расшифровка осциллограмм, в активной зоне резко поднялась температура с выходом на частичное объемное кипение теплоносителя, и реактор сам выполнил функцию аварийной защиты, подавив свою мощность. Оператор, на полминуты позднее нажавший кнопку аварий-

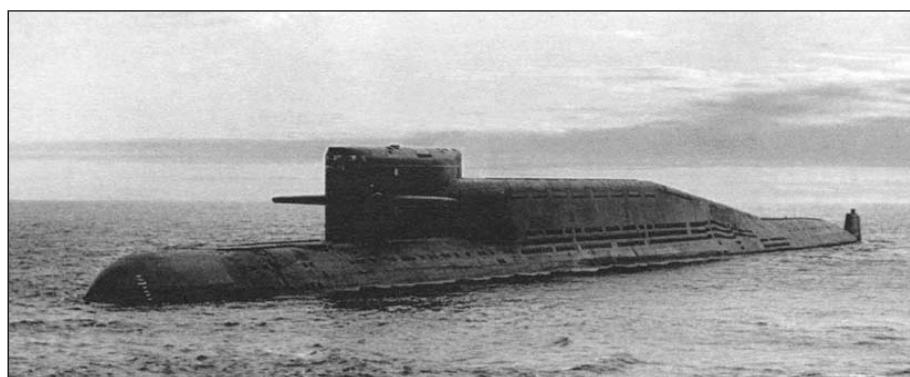


Рис. 2. Атомная подводная лодка 2-го поколения, проект 667БДР



ной защиты, просто подхватил ситуацию уже на неопасном участке переходного процесса. Пришлось пережить несколько бессонных ночей, пока результаты радиохимического анализа теплоносителя I контура не подтвердили, что кризиса не произошло. За этой активной зоной я впоследствии следил до ее выгрузки. Зона несколько не пострадала в результате проведенного «диверсионного» режима.

Во время доклада результатов испытаний на межведомственном научно-техническом совете (НТС) под председательством академика А.П. Александрова я не подчеркивал, что отмеченный выше режим не был запланированным, но от зоркого глаза Анатолия Петровича ничего утаить было невозможно. Пришлось детально рассказать о возникшей нештатной ситуации, результаты которой в итоге дали еще более ценную информацию, чем режимы по запланированной программе. После доклада А.П. Александров высоко оценил результаты данной работы как для плавающих объектов, так и для нового проектирования, особо отмечив надежность резервных возможностей охлаждения активной зоны реакторов ПЛА II поколения в случаях аварийного обесточивания ГЦНПК и необходимость внесения соответствующих дополнений в эксплуатационную документацию. С этой целью по совместному решению промышленности и ВМФ возглавляемой мной межведомственной комиссией в том же составе были проведены дополнительные испытания по расхолаживанию реакторной установки на ЕЦТ на серийной ПЛА II поколения, находящейся в эксплуатации.

Мысли об использовании ЕЦТ как надежного резервного средства на случай прекращения принудительной циркуляции теплоносителя в реакторных установках ПЛА в условиях ограниченной емкости аккумуляторной батареи владели умами многих специалистов. Наше положение в плане влияния на ход событий облегчалось тем, что мы были институтом Заказчика, обладающим большими возможностями.

В решении проблемы проявилась консолидация усилий многих специалистов и организаций различных ведомств. Нельзя не отметить большой вклад сотрудников ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова — А.А. Крайнова, Б.М. Лихтерова, Д.И. Галеева, ОКБМ — О.Б. Самойлова,

Г.Ф. Носова, В.А. Будникова, Института атомной энергии им. И.В. Курчатова — Г.А. Гладкова, О.К. Лебедева, А.М. Чечурова, НИКИЭТ — В.Н. Аксеновой, Г.А. Станиславского, ВВМИОЛУ им. Ф.Э. Дзержинского — начальника кафедры ядерных реакторов доктора технических наук профессора Б.Д. Гусева и многих других.

Нашей заслугой (1 ЦНИИ МО) стало научное обоснование требований ВМФ к реакторной установке III поколения в части существенного расширения возможностей использования ЕЦТ, которые сводились к следующему:

за счет увеличения вертикального смещения парогенератора относительно активной зоны реактора уровень мощности на ЕЦТ в первом контуре должен обеспечивать не только аварийное расхолаживание реактора, но и частичные ходовые режимы ПЛА при неработающих ГЦНПК. Такое новое качество не только повышает безопасность и живучесть ЯЭУ, но и улучшает тактические свойства ПЛА, благодаря снижению шумности. В условиях здоровой конкурентной борьбы за выигрыш конкурса на проектирование реакторной установки для ПЛА III поколения КБ промышленности стремились в своих проектах к максимальному удовлетворению наших требований. Помню дословно реакцию Главного конструктора ОКБМ И.И. Африканова на требование обеспечения форсированной ЕЦТ: «Я не знаю, зачем вам это нужно, но если нужно — я сделаю» (Игорь Иванович был очень ярким человеком во всех проявлениях; в приведенном выше фрагменте разговора вместо слова «Зачем» фигурировало крепкое русское словечко, которое я в официальном печатном издании употребить не мог).

Главное то, что в его проекте ОК-650 Б, представленном ОКБМ на конкурс (и выигравшем его), данное требование было выполнено и реализовано во всех проектах ПЛА III и IV поколения (рис. 3), находящихся в эксплуатации и в постройке в настоящее время. Режим работы на ЕЦТ стал не только аварийным, но и нормальным эксплуатационным.

Исключительно важную роль в создании и отработке корабельной ядерной энергетики играет Научно-исследовательский технологический институт (НИТИ) в г. Сосновый Бор Ленинградской области. В нынешнем 2012 году



Рис. 3. Атомная подводная лодка 3-го поколения, проект 971

Институт отмечает свое 50-летие. Мне посчастливилось быть первым руководителем военного представительства в НИТИ в период 1969–1981 годов, когда активная деятельность Института была связана с необходимостью обеспечения широкомасштабной программы военного кораблестроения. Военное представительство в соответствии с директивой Главного управления кораблестроения, по существу, являлось научным подразделением 1 ЦНИИ МО для непосредственного участия в испытаниях и отработке натурных ЯЭУ в интересах ВМФ (Заказчик). Для осуществления приемки монтажных и наладочных работ в подчинение мне как руководителю Головного военного представительства направлялись группы военпредов соответствующих судостроительных заводов. Наша деятельность в тот незабываемый период была очень ответственной и интересной, так как была связана с совершенно новыми пионерскими техническими решениями уникальных корабельных ЯЭУ.

Первоначально НИТИ создавался как ГИС — государственная испытательная станция новых проектов корабельных ЯЭУ (натурных наземных прототипов). Натурные испытания позволяют выявить то, что не могло быть учтено на этапе проектирования из-за недостатка данных. Кроме отработки технологии монтажа, проверки совместного функционирования механических, электрических, управляющих систем, уточнения соответствия фактических характеристик заданным, в ходе натурных испытаний проверяются во всем диапазоне мощностей динамические параметры энергетической установки в целом

в переходных и аварийных режимах. Благодаря активной позиции руководства — директора Александра Николаевича Проценко, сменившего его Евгения Петровича Рязанцева, Главного инженера Эрика Сергеевича Брянских, опиравшихся на большие возможности молодого творческого дерзящего коллектива, НИТИ вышел за предписанные ему узкие функциональные рамки. Он превратился в уникальный научно-исследовательский институт, глубоко изучающий особенности сложных процессов, протекающих в ЯЭУ, способный на базе тщательного анализа результатов натурных испытаний выдавать правильные рекомендации, требующие обязательного учета и внедрения в корабельные образцы.

Я и сотрудники военного представительства В.В. Шмуля и Н.Н. Монахов непосредственно участвовали в испытаниях и отработке трех наземных натурных ЯЭУ:

ВАУ-6С (разработчик НИКИЭТ) с корпусным водо-водяным реактором кипящего типа;

ОК-550 (разработчик ОКБМ) с жидкотермическим теплоносителем «свинец—висмут»;

ОК-650Б с водо-водяным реактором с высоким уровнем мощности при работе на ЕЦТ в I контуре.

В НИТИ удалось проверить уже на практике, непосредственно в металле форсированную ЕЦТ в конструкции реакторного блока с поднятыми парогенераторами — в ЯЭУ ОК-650Б. На установке ОК-550 были в натурных условиях отработаны технология тяжелого теплоносителя (ТТТ), парогенератор (разработки ОКБ «Гидропресс», Главный конструктор — В.В. Стекольников) и осуществлена комплексная проверка



стационарных и переходных эксплуатационных режимов.

Участвовали в испытаниях и в ликвидации последствий ядерной аварии на установке ВАУ-6С, которая была связана с недостаточной изученностью сложных взаимосвязей теплогидродинамических и нейтронно-физических процессов на стадии проектирования, а также в последующей ее модернизации. Установка очень интересная, одноконтурная, маленькая. Она разрабатывалась как «подвеска» для дизельных подводных лодок с целью увеличения их автономности и приближения по своим возможностям к ПЛА. Установка была отработана, принята Межведомственной комиссией, но в связи с существенным изменением нашей военной доктрины это очень интересное решение не нашло применения в модернизации дизель-электрических подводных лодок.

Для меня этот период работы в тесном сотрудничестве с творческим коллективом НИТИ незабываем.

Молодые талантливые специалисты НИТИ (ряд из них — выпускники СПбГПУ) стали впоследствии видными учеными, руководителями подразделений, докторами наук, известными как в России, так и за рубежом: среди них С.Д. Малкин, Л.Н. Москвин, В.Б. Хабенский, И.С. Орленков, А.В. Ельшин, В.Н. Зимаков, Ю.А. Мигров и др. Такие ведущие специалисты, как ставший в дальнейшем Главным инженером В.П. Журавлев, начальник всего технологического комплекса натурных ЯЭУ В.Е. Воронин, начальник стенда с установкой ВАУ-6С В.П. Сидорович, начальник стенда КМ-1 с установкой ОК-550 О.Г. Панов, начальник стенда КВ-1 с установкой ОК-650Б А.И. Хозичев, проявили себя профессионалами высокого класса, глубоко разбирающимися в тонкостях сложных процессов, протекающих в системах ЯЭУ, умелыми руководителями подчиненных технологических служб. Важнейшее направление метрологического обеспечения в условиях высокой степени автоматизации регистрации и анализа параметров испытаний осуществлялось квалифицированным коллективом под руководством А.П. Лукашова — талантливого высококлассного творческого специалиста, создавшего множество уникальных, простых и надежных приборов в области измерительной техники различного назначения

для корабельной ядерной энергетики. Нет возможности в кратком материале подробно останавливаться на активной результативной деятельности многих структур Института и их сотрудников.

За большие заслуги в области развития корабельной атомной энергетики НИТИ было присвоено имя его основателя — академика А.П. Александрова. Особо следует отметить ту роль, которую сыграл в становлении и развитии Института его Главный инженер лауреат Государственной премии СССР Э.С. Брянских, занимавший этот пост с 1964-го по 1991 год. По всему комплексу профессиональных и человеческих качеств его можно отнести к категории выдающихся крупномасштабных личностей. Я испытываю большое удовлетворение оттого, что, несмотря на разную ведомственную принадлежность, наши оценки важнейших ситуаций на натурных полномасштабных ЯЭУ в научно-техническом плане практически всегда совпадали, и горжусь тем, что вплоть до преждевременного ухода Эрика Сергеевича из жизни (в 1998 году) у нас сохранялись самые теплые, дружеские отношения. Э.С. Брянских выполнил очень важную задачу: подготовил материалы для книги, посвященной истории НИТИ, его становлению, опыту отработки натурных ЯЭУ, которая уже после его кончины вышла в свет в 2004 году, под названием «Подводная одиссея НИТИ им. А.П. Александрова» (СПб.: Моринтех, 2004). Память об Э.С. Брянских увековечена мемориальной доской на стенах административного здания НИТИ.

Нынешнее руководство НИТИ в лице Генерального директора Вячеслава Андреевича Василенко, крупного ученого и организатора, доктора технических наук, Заслуженного деятеля науки РФ, возглавляющего Институт в течение 20 лет, опираясь на высококвалифицированный коллектив, обеспечивает активное функционирование Института в нынешнее непростое для науки время. Институт занимает прочное ведущее положение не только в исследованиях по оборонной тематике, но и в области стационарной ядерной энергетики. В НИТИ была испытана и отработана ЯЭУ с реактором интегрального типа со всережимной ЕЦТ (проект ОКБМ) и получены важные результаты как для объектов ВМФ, так и для стационарной энергетики.



В настоящее время СПбГПУ и НИТИ связывают прочные связи как в научной сфере, так и в деле подготовки специалистов для атомной отрасли — не только инженеров, но и ученых высшей квалификации: докторов и кандидатов наук. Наши выпускники успешно работают в НИТИ, добиваясь высоких профессиональных результатов.

И сейчас научно-конструкторская мысль не стоит на месте, имеются интересные проекты реакторных установок. Беда в том, что нет программы военного кораблестроения, достойной нашей великой морской державы. Восторги по поводу закладки и строительства единичных ПЛА трудно разделять, так как они лишь прикрывают тяжелое положение в российском военном кораблестроении. В середине 1970-х годов СМП строило на стапелях в закрытых цехах одновременно несколько ПЛА. Можно ли было в начале перестройки переводить в условиях дефицитной экономики на рыночные рельсы такой стратегический завод, как СМП (градообразующий для Северодвинска), оставив его без оборонного госзаказа? Такой верфи, такого кадрового потенциала нет у наших зарубежных «друзей». Высококлассные судостроители в сложившейся ситуации в 1990-е годы получали мизерные пособия. Сейчас СМП практически в значительной степени перепрофилирован для нужд нефтяной отрасли и гражданского судостроения. Тяжелое положение сложилось с Балтийским судостроительным заводом, флагманом отечественного атомного надводного кораблестроения, способным строить не только ледоко-

лы, но и тяжелые атомные ракетные крейсера типа «Адмирал Ушаков». Я знаком с этим великолепным кораблем, так как в 1980 году, когда он имел название «Киров» (рис. 4), был привлечен к работе Правительственной комиссии по его приемке и участвовал в перегоне с Балтики на Северный флот. Сейчас завод находится на грани банкротства. Хотелось бы надеяться, что он будет спасен заказами плавучих атомных электростанций и ледоколов. Вызывает недоумение проявляющееся желание определенных кругов ликвидировать судостроительные заводы Санкт-Петербурга с переводом их в Кронштадт. Это не безобидная «хлестаковщина», а откровенное разрушение промышленного потенциала, требующее колоссальных финансовых затрат, в угоду завоевывания поистине «золотых земель» с целью получения в будущем суперприбыли.

В отсутствие достойной программы военно-го кораблестроения утрачиваются высокие технологии на машиностроительных и судостроительных заводах. Состарились или ушли в иной мир высококвалифицированные специалисты, которым некому было передавать свой опыт, свои «know-how». Прервана информационная наследственность, в определенной степени пострадала высокая культура реакторостроения. Отечественная реакторная техника не только не уступала, но и превосходила зарубежную. За перестроечный период мы многое потеряли. Были разумные предложения об использовании проектов корабельных реакторных установок в качестве стационарных модулей в подземном



Рис. 4. Тяжелый атомный ракетный крейсер (проект 1144) «Адмирал Ушаков» (до 1991 года — «Киров») — головной из этой серии постройки Балтийского судостроительного завода (снимок 1980 года)



и обычном вариантах их размещения. С этими проектами неоднократной выступал Главный конструктор ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова Эрнест Леонидович Петров, председатель регионального правления Ядерного общества РФ (трагически погибший в августе 2006 года). Задействовав корабельную энергетику, мы «убили бы сразу двух зайцев»: обеспечили бы энергией те регионы, где указанное направление является предпочтительным, и не потеряли бы высокие реакторные технологии, чтобы впоследствии не пришлось начинать с нуля. В то же время я не являюсь сторонником использования для гражданских нужд энергоблоков с ЖМТ. Считаю, что ЖМТ должен использоваться для решения стратегических (военных) задач, где без его преимуществ не обойтись, а в других случаях нужно идти на более простые технологические решения.

Сейчас на Балтийском заводе начато строительство плавучей АЭС на базе корабельных энергетических установок КЛТ-40 (Главный конструктор ЯЭУ — ОКБМ). Это транспортабельная установка, которую можно перемещать водным путем в те точки, где в данный момент ощущается острый дефицит электроэнергии, например при строительстве новых городов, поселков, при проведении геологоразведочных работ. Первая транспортабельная установка ТЭС-3 была создана еще в Ленинградском ЦКБ машиностроения (бывшем КБ Кировского завода) под руководством Главного конструктора Николая Михайловича Синёва. На базе корабельной АЭУ I поколения была сделана передвижная АЭС на гусеничном ходу. На четырех платформах были смонтированы реактор, паротурбинная и электротехническая части и пульт управления. Этот энергетический комплекс мог самостоятельно перемещаться до нужного места, где мог быть размещен в специальной траншее, отвалы которой выполняли бы роль биологической защиты.

Есть и другие предложения по использованию технологии корабельных реакторных установок в энергетике средней мощности, например ВБЭР-300 блочного типа (ОКБМ). Имеются основания надеяться, что ВБЭР-300 найдет широкое применение в России и будет востребован за рубежом.

Выходя за рамки корабельной энергетики, нельзя не отметить, что серьезный кризис не

обошел стороной и стационарную энергетику. В осуждаемый ныне авторитарный период управления страной мы сумели через 9 лет после страшной войны, физически разрушивший значительную часть промышленного потенциала страны, построить первую в мире атомную электростанцию и стать лидерами в развитии атомной энергетики, как стационарной, так и корабельной.

Атомная энергетика — особый вид энергетики, которая из-за потенциальной опасности требует очень взвешенных сбалансированных решений по всему комплексу технологических структур разветвленного топливного цикла, т. е. учитывая масштабы нашей страны, требуется активная действенная управляемость отраслью по линии государства. Раньше эти функции выполняло Министерство среднего машиностроения, которое называли «государством в государстве». Оно отвечало за все вопросы ядерной энергетики, и это определяло наши преимущества перед другими странами. Сейчас в условиях акционирования предприятий атомной отрасли, в том числе и атомного машиностроения, государство усложнило себе возможность активно управлять отраслью. Как получилось, что флагман реакторостроения монолитный Ижорский завод, который вместе с ЦНИИ «Прометей» делал чудеса (я это прочувствовал на примере уникального блока корпусов реактора ОК-650 Б, когда курировал эту установку по линии ВМФ) превратился в раздробленные «Ижорские заводы»? Таких примеров много. В настящее время энергетики России воодушевлены позицией руководства страны, поставившего грандиозные задачи по вводу в действие атомных энергоблоков, и поддерживают активную деятельность госкорпорации «Росатом», направленную на реализацию этой программы как на отечественных площадках, так и за рубежом. Вызывает глубокое удовлетворение строительство ЛАЭС-2 в Сосновом Бору (Генеральный проектировщик — Санкт-Петербургский «Атомэнергопроект»).

За примерами недавнего тяжелого положения отрасли далеко ходить не надо. Если в до-перестроечный период на Калининской АЭС временной интервал между вводом в действие 1-го и 2-го блока составил 2 года (1984 и 1986 г.), то между 2-м и 3-м в условиях перестройки —



19 лет (1986–2005 гг.). Вдохновляет, что 4-й блок уже построен в сжатые сроки (2011 г.). Разрушительная деятельность известного политика Б.Е. Немцова, его спекуляция на «последчернобыльском шоке» населения в период вхождения во власть привели к физическому уничтожению готовой к пуску атомной станции теплоснабжения АСТ-500 (Главный конструктор — академик Ф.М. Митенков, ОКБМ), способной обеспечить экологически чистым теплом одну треть Нижнего Новгорода. В АСТ-500 была обеспечена максимальная надежность и безопасность благодаря низкому давлению в I контуре (всего 2 МПа), всережимной ЕЦТ, моноблочному исполнению в дополнительном страховочном корпусе, нескольким дополнительным барьерам безопасности (в виде последовательных контуров промежуточного теплоносителя) на пути передачи тепла к бытовому потребителю.

Проект АЭС с ВВЭР-640 (Генеральный проектировщик — Санкт-Петербургский «Атомэнергопроект», Главный конструктор реакторной установки — ОКБ «Гидропресс», г. Погольск) средней мощности, отвечающий самым современным требованиям по безопасности, с увеличенным сроком службы, со спокойным прохождением динамических режимов из-за пониженной энергонапряженности активной зоны, был загублен бывшим руководством Минатома, несмотря на наличие Постановления Правительства о строительстве и вводе его в действие в г. Сосновый Бор еще до 2000 г.

К сожалению, мы не можем конкурировать с Западом по проектам ВВЭР большой мощности (из-за их отсутствия). Это показал проигрыш тендера в Финляндии, несмотря на то, что моральный климат там, сформированный при постройке АЭС «Ловииса» с реакторами ВВЭР-440, был в пользу России. Требуется интенсификация работ по проекту БН-800 с натриевым теплоносителем, чтобы не потерять лидирующие позиции по реакторам на быстрых нейтронах. Наша страна обладает уникальной технологией регенерации отработанного ядерного топлива (ОЯТ), но до сих пор не создана линия по регенерации ОЯТ ВВЭР-1000, которая должна была быть задействована еще в прошлом веке. Временные хранилища ОЯТ на АЭС с РБМК близки к полному заполнению. Эта проблема пока далека от ее кардинального решения.

Нет нужды приводить другие примеры, свидетельствующие о том, что перед «Росатомом» стоят сложнейшие задачи выполнения грандиозных планов на российских площадках и за рубежом в условиях рынка и нынешнего состояния производственной базы. Занимаясь подготовкой специалистов для атомной отрасли, имея тесные контакты с ее предприятиями, мы знаем, какой кадровый кризис они испытывают. Намеченный атомный «ренессанс» потребует большого количества хорошо подготовленных специалистов. В условиях перехода на двухуровневую систему высшего профессионального образования (бакалавр, магистр), когда важнейшая категория «инженер» выпала из числа основных, решение этой задачи усложняется. Ведь атомщиком «нужно родиться», т. е. «с пеленок», со студенческой скамьи будущий специалист должен понимать, что такая ядерная безопасность, что такая реактивностная авария и др., чтобы не переходить в будущем на панибретский тон с атомной энергетикой и обращаться с ней «на Вы». Не следует забывать, что косвенно одной из причин чернобыльской катастрофы была передача атомных станций из Минсредмаша в ведение Минэнерго, в котором за долгие годы сформировался иной эксплуатационный почерк на энергоблоках с органическим топливом. На Ленинградской АЭС авария «чернобыльского типа» была бы принципиально невозможна в условиях жесткой технологической и административной «средмашевской» дисциплины, которой была пронизана деятельность ее директора доктора технических наук профессора Анатолия Павловича Еперина и всех звеньев станции.

Многие достижения, полученные при проведении работ по корабельной ядерной энергетике, могут быть использованы в стационарной энергетике. Технологическая документация по обеспечению высокой степени чистоты при изготовлении и наладке оборудования I контура может быть успешно использована в отрасли. В корабельном атомном парогенераторостроении широко используются титановые сплавы, которые обеспечивают высокие ресурсные показатели поверхностей нагрева. Эти достижения могут быть использованы в стационарной атомной энергетике для обеспечения срока службы трубной части парогенератора, равного сроку службы реактора (50–60 лет в новых проектах).



Достойное место в будущих проектах должны занять прямоточные парогенераторы, обеспечивающие высокие маневренные качества энергоблоков, которые становятся актуальными при работе в энергосистемах в условиях переменных графиков нагрузок.

В стационарной атомной энергетике существуют лучшие условия для использования ЕЦТ в I контуре по сравнению с корабельными ЯЭУ. В настоящее время мы в тесном сотрудничестве с ведущими предприятиями атомной отрасли при участии НИЯУ МИФИ проводим работы по обоснованию и внедрению в проектах АЭС с ВВЭР-1000 (1200) энергетических режимов работы на ЕЦТ при прекращении принудительной циркуляции теплоносителя I контура. Положительное решение этой задачи позволит расширить эксплуатационные возможности АЭС, существенно повысить ее надежность, безопасность и живу-

честь (говоря корабельным языком) при длительном внешнем аварийном обесточивании, благодаря реализации возможности «самозапуска».

Для завоевания зарубежного рынка отечественные реакторостроители должны предлагать целый набор реакторов — от малых до полутора-миллионных мощностей, полностью отработанных на своих площадках. Зарубежных заказчиков бумажные проекты не интересуют. А для этого нам нужно возродить всю промышленную инфраструктуру, укомплектованную высококвалифицированными кадрами. Научный потенциал отрасли, который держится на энтузиазме и патриотизме сторонников атомной энергетики, в России пока еще не растерян и подпитывается выпускниками ряда вузов страны, среди которых одно из ведущих мест занимает Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.



# ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.311.22(075.8)

*В.Г. Киселёв*

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ И КИНЕТИЧЕСКАЯ ТРАКТОВКА ПОТЕНЦИАЛА ПОГРУЖЕНИЯ

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

тально. Объяснение этого явления, которое дали, например, К. Феттер и позднее, в несколько видоизмененной форме, Р.Р. Салем [1], основывается на анализе структуры двойного электрического слоя и ее изменения в процессе погружения «маленького» электрода. Р.Р. Салем привлекает для исследования также понятие поверхностного скачка потенциалов на границе «жидкость — воздух», т. е. величину, которую сложно вычислить или определить экспериментально. Вероятно, некоторая академичность существующей трактовки сущности потенциала погружения и отсутствие прямой связи с реальными практически важными электрохимическими процессами привели к тому, что интерес к исследованию этого явления в последнее время, как отмечают оба автора, заметно упал. Да и само объяснение потенциала погружения в рамках принятой концепции, по мнению тех же авторов, не свободно от противоречий. В данной статье сделана попытка объяснить сущность потенциала Биллитера на основе простых термодинамических и кинетических соотношений и указать на его связь с коррозионными процессами, например с коррозией по ватерлинии в зоне брызг.

### Термодинамическая трактовка потенциала погружения

Как следует из экспериментальных данных, величина потенциала погружения не зависит ни от вида металла, ни от формы двойного электрического слоя, ни от типа электрохимического процесса, протекающего на границе раздела фаз. Поэтому для доказательства его существования и постоянства необходимо рассмотреть все эти виды электрохимических систем.



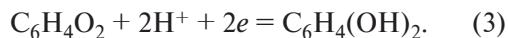
Любой электрохимический процесс в общем случае можно представить в следующей форме:



где  $\text{Ox}$  — окислитель,  $z$  — количество электронов  $e$ , которые принимает окислитель из металла, а  $R$  — восстановленная форма окислителя. Постоянство потенциала погружения по существу означает, что при потенциале погружения для любого металла, в том числе и при наличии поверхностно-активных веществ в системе, наблюдается равновесное состояние для реакции (1) вне зависимости от ее вида. Таким образом, при потенциале погружения изменение энергии Гиббса для реакции (1) равно нулю, что можно выразить следующим образом:

$$\Delta G = 0. \quad (2)$$

Рассмотрим для определенности систему, состоящую из платинового электрода, погруженного в раствор электролита, в котором потенциал задается окислительно-восстановительной системой, например «хинон — гидрохинон»:



В соответствии с теорией электродного потенциала при изменении соотношения концентраций (активностей) компонент системы «хинон — гидрохинон» будет меняться и равновесный электродный потенциал платинового электрода. При этом очевидно, что существует некоторое соотношение концентраций системы  $c_x/c_r$  (некоторое соотношение активностей системы  $a_x/a_r$ ) в растворе, при достижении которого при опыте погружения отсутствует направленный переход зарядов через границу раздела фаз, что сопровождается обращением в ноль энергии Гиббса соответствующей электрохимической реакции, в данном случае реакции (1). Зафиксируем этот потенциал, произведя его измерение относительно стандартного электрода сравнения, например стандартного водородного электрода сравнения, и обозначим его как  $\varphi_b$ .

Отсюда в соответствии с теорией электродного потенциала, непосредственно следует, что при погружении платинового электрода в раствор, содержащий окислительно-восстановительную систему, при потенциалах выше  $\varphi_b$  наблюдается катодный процесс, а при потенциалах ниже  $\varphi_b$  анодный процесс, соответственно при потенциале, равном  $\varphi_b$ , электрохимическая реакция не протекает. Следует подчеркнуть, что этот вывод был получен для платинового элек-

трова безотносительно его площади поверхности, т. е. он справедлив как для «больших», так и для «маленьких» электродов. В случае, если мы соединим большой электрод с маленьким электродом металлическим проводником через гальванометр и одновременно погрузим их в электролит, стрелка гальванометра останется на месте при потенциале, равном  $\varphi_b$ . Этот потенциал (потенциал погружения) экспериментально был обнаружен Биллитером и с тех пор носит его имя. Очевидно, что ничего не изменится, если погружаться будет только маленький электрод, когда большой будет находиться в погруженном состоянии при потенциале погружения. Таким образом, можно сделать вывод, что для рассмотренной системы «малый — большой электроды», изготовленной из любого вида металла, вне зависимости от вида этого металла и типа электрохимического процесса, протекающего в системе, существует потенциал, при котором система находится в равновесии при погружении ее в раствор электролита.

Повторим те же рассуждения для случая, когда большой металлический электрод находится в электролите и его равновесный потенциал больше потенциала Биллитера. Тогда при погружении маленького электрода на нем будет происходить катодный процесс и ток будет направлен из электролита к маленькому металлическому электроду, в том числе и через большой электрод. Это фактически означает, что его равновесный потенциал в начальный период погружения меньше соответствующего равновесного потенциала большого электрода, что и приводит к экспериментально наблюдаемому электрическому току по металлическому проводнику через гальванометр от большого электрода к маленькому. Однако это явление доступно для наблюдения только при выбранном соотношении площадей электродов, когда площадь маленького электрода значительно меньше площади большого и, следовательно, плотность катодного тока на его поверхности и электродная поляризация значительно больше соответствующих величин для большого электрода. Необходимо подчеркнуть, что в этом случае и на большом электроде протекает катодная реакция. При обратном соотношении площадей электродов ток, текущий через гальванометр, был бы, возможно, слишком мал и недоступен для регистрации.



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

Прямыми доказательством справедливости рассуждений, приведенных в данном разделе для случая окислительно-восстановительных систем, можно считать указанную в монографии [2] независимость работы  $\lambda_{pm}$  выхода электрона из металла в раствор от вида металла. Величина  $\lambda_{pm}$  определяется разностью электрохимических потенциалов электрона в растворе  $\bar{\mu}_{ep}$  и металле  $\bar{\mu}_{em}$

$$\lambda_{pm} = \bar{\mu}_{ep} - \bar{\mu}_{em}. \quad (4)$$

Разложим величины электрохимических потенциалов на электростатические и химические составляющие. Тогда из предыдущего уравнения получаем

$$\begin{aligned} \lambda_{pm} &= \mu_{ep} - F\Phi_p - \mu_{em} + F\Phi_m = \\ &= \mu_{ep} + \mu_{em} + F\Phi_{mp}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\Phi_p$  и  $\Phi_m$  — соответственно внутренний потенциал электрона в растворе и в металле, а  $\Phi_{mp}$  — потенциал Гальвани на границе «раствор—металл». Из последнего уравнения очевидно, что работа выхода электрона из металла в раствор является функцией разности электрических потенциалов на этой границе. Однако практиче-

ские измерения электродных потенциалов осуществляют при заданной разности потенциалов на концах некоторой электрохимической цепи, содержащей стандартный электрод сравнения. Примем, что наша система состоит из стандартного водородного электрода сравнения, расположенного слева, и исследуемого металлического электрода, расположенного справа, а диффузионный потенциал в электролите исключен. Для создания нормально разомкнутой цепи используются платина, контактирующая с правым электродом. Обозначим потенциал этой системы через  $\varphi$ . Тогда можно записать следующее выражение для скачков потенциала на границах данной электрохимической системы:

$$\varphi = \Phi_{pPt} + \Phi_{pm} + \Phi_{PtM}. \quad (6)$$

Кроме того, необходимо учесть, что в соответствии с теорией потенциалов Вольта для разности потенциалов на границе двух металлов —  $\Phi_{PtM}$  — справедливо следующее соотношение

$$\Phi_{PtM} = \frac{\mu_{ep} - \mu_{em}}{F}, \quad (7)$$

где  $\mu_{ep}$  и  $\mu_{em}$  — химические потенциалы электрона соответственно в платине и рассматриваемом металле. Из последних трех уравнений получаем

$$\begin{aligned} \lambda_{pm} &= \mu_{ep} - \mu_{em} + F\varphi = F\Phi_{pPt} - F\Phi_{PtM} = \\ &= \mu_{ep} - \mu_{ep} - F\Phi_{Pt} + F\varphi. \end{aligned} \quad (8)$$

Поскольку величины  $\mu_{ep}$ ,  $\mu_{ep}$  и  $\Phi_{pPt}$  при данной концентрации определяющих ионов зависят только от выбранного электрода сравнения и вида растворителя, то последнее уравнение можно представить в следующем виде:

$$\lambda_{pm} = \text{const} + F\varphi. \quad (9)$$

Данная формула означает, что работа выхода электрона из металла в раствор при заданном потенциале  $\varphi$  не зависит от вида металла. С ее помощью, а также с учетом замечаний, сделанных после уравнения (8), уравнение (5) для любого данного конкретного значения потенциала  $\varphi$  можно преобразовать к виду

$$zF\Phi_{pm} = z\mu_{em} + z(\text{const}) = (\text{const})^*. \quad (10)$$

Воспользуемся полученным результатом для анализа уравнения (1), приняв с целью упроще-



ния последующих вычислений, что внутренний потенциал раствора равен нулю. В этом случае для любой электрохимической системы можно записать следующее уравнение

$$\mu_{R_p} - \mu_{Ox_p} - z\mu_{e_m} = -zF\Phi_{mp}, \quad (11)$$

где  $\mu_{R_p}$  — электрохимический потенциал вещества  $R$  в растворе;  $\mu_{Ox_p}$  — электрохимический потенциал вещества  $Ox$  в растворе;  $\mu_{e_m}$  — электрохимический потенциал электронов в металле. На основании уравнения (10) при любом заданном потенциале уравнение (11) можно переписать так:

$$\mu_{R_p} - \mu_{Ox_p} = \text{const.} \quad (12)$$

Полученный результат можно интерпретировать следующим образом:

вне зависимости от конкретного вида реакции (1) и вида металла существует некоторый потенциал, одинаковый для всех электрохимических систем, при котором в опыте погружения увеличение активности  $Ox$  или уменьшение активности  $R$  приводит к протеканию катодного процесса, соответственно уменьшение активности  $Ox$  или увеличение активности  $R$  приводит к протеканию анодного процесса;

этот потенциал, экспериментально обнаруженный Биллитером, составляет 0,475 В по водородному электроду сравнения, поэтому реально достижим только для достаточно электроположительных металлов (золото, платина, серебро, ртуть, медь), находящихся в равновесии со своими собственными ионами в электрохимической системе.

В силу наличия в уравнении (1) постоянной составляющей (const), которая является функцией потенциала  $\phi$ , равенство  $\Phi_{mp} = 0$  нельзя рассматривать как равенство нулю потенциала Гальвани на границе «раствор — металл», при котором происходит изменение знака энергии Гиббса реакции (1).

В применении к рассматриваемой системе «маленький электрод — большой электрод», погруженной в раствор, содержащий окислительно-восстановительную систему, например типа (3), это означает, что при потенциале погружения  $\phi_b$  будет происходить обращение тока для любого вида металла и для любого конкретного вида реакции (3).

Последнее утверждение можно расширить и на область ионно-металлических электродов,

если учесть, что как растворение, так и осаждение металла происходят через стадию адсорбции атомов металла на его поверхности, и принять, что это состояние также можно отнести к состоянию нахождения восстановленного компонента в растворителе. Как уже говорилось ранее, принятное предположение подтверждается экспериментально, например при определении потенциала погружения ртути в случае использования систем, включающих ее соли.

### Кинетическая трактовка потенциала погружения

Без ограничения общности с целью упрощения изложения материала остановимся на рассмотрении кинетики электрохимических процессов при наличии двойного электрического слоя, описываемой моделью Гельмгольца при отсутствии адсорбции реагентов на электродной поверхности. Пусть в системе протекает электрохимический процесс, описываемый реакцией (1). Конкретный механизм рассматриваемой реакции на данном этапе рассуждений не важен. В соответствии с теорией абсолютных скоростей реакций скорость катодного процесса определяется следующей формулой:

$$\bar{i} = \bar{k}a_0 e^{-\frac{\Delta G^*}{RT}}, \quad (13)$$

где  $\bar{i}$  — плотность катодного тока;  $\bar{k}$  — константа скорости катодной реакции;  $a_0$  — активность окисленного компонента реакции;  $\Delta G^*$  — свободная энергия активации катодного процесса;  $R$  — универсальная газовая постоянная, а  $T$  — абсолютная температура.

Аналогично для анодного процесса имеем

$$\bar{i} = \bar{k}a_R e^{-\frac{\Delta G^*}{RT}}, \quad (14)$$

где  $\bar{i}$  — плотность анодного тока;  $\bar{k}$  — константа скорости анодной реакции;  $a_R$  — активность восстановленного компонента реакции;  $\Delta G^*$  — свободная энергия активации анодного процесса;  $R$  — универсальная газовая постоянная, а  $T$  — абсолютная температура.

В соответствии с правилом Бренстеда, распространенным М. Поляни и Н.Н. Семеновым на любой класс однотипных химических реакций, изменение энергии активации реакции

$\delta(\overline{\Delta G}^\neq)$  составляет некоторую долю  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )

от изменения теплового эффекта реакции, что можно представить следующим образом:

$$\delta(\overline{\Delta G}^\neq) = \alpha \delta(\Delta C_2 - \Delta C_1), \quad (15)$$

где  $\Delta C_1$  означает свободную энергию системы в исходном состоянии, а  $\Delta C_2$  — соответственно, свободную энергию системы в конечном состоянии.  $\Delta C_1$  и  $\Delta C_2$  для случая стандартной системы можно представить в следующем виде:

$$\Delta C_1 = \overline{\mu_{0Ox_p}} + z\overline{\mu_e}; \quad (16)$$

$$\Delta C_2 = \overline{\mu_{0R_p}}, \quad (17)$$

где  $\overline{\mu_{0Ox_p}}$  — стандартный электрохимический потенциал окислителя в растворе;  $\overline{\mu_e}$  — электрохимический потенциал электронов в металле;  $\overline{\mu_{0R_p}}$  — стандартный электрохимический потенциал восстановленного вещества в растворе. В данном случае удобно предположить, что внутренний потенциал раствора равен нулю, т. е.  $\Phi_p = 0$ . Такое предположение упрощает вычисления, не изменяя их конечный результат. Тогда вместо последних двух уравнений можно записать

$$\Delta C_1 = \overline{\mu_{0Ox_p}} + z\overline{\mu_e} - zF\Phi_{mp}; \quad (18)$$

$$\Delta C_2 = \overline{\mu_{0R_p}}, \quad (19)$$

где  $\overline{\mu_{0Ox_p}}$  — стандартный химический потенциал окисленного вещества в растворе;  $\overline{\mu_e}$  — химический потенциал электрона в металле;  $\Phi_{mp}$  — потенциал Гальвани «раствор — металл», который равен внутреннему потенциалу металла;  $\overline{\mu_{0R_p}}$  — стандартный химический потенциал восстановленного вещества в растворе. Используя соотношения (15), (18) и (19), находим

$$\begin{aligned} \overline{\Delta G}^\neq &= \Delta G_0^\neq + \alpha(\Delta G_2 - \Delta G_1) = \\ &= \Delta G_0^\neq + \alpha(\overline{\mu_{0R_p}} - \overline{\mu_{0Ox_p}} - z\overline{\mu_e}) + azF\Phi_{mp}, \end{aligned} \quad (20)$$

где  $\Delta G_0^\neq$  — энергия активации при равенстве энергетических уровней первого и второго состояний ( $\Delta G_2 = \Delta G_1$ ), т. е. при выполнении следующего равенства для случая протекания электрохимического процесса в условиях стандартного состояния:

$$(\mu_{0R_p} - \mu_{0Ox_p} - z\mu_e) = -zF(\Phi_{mp})^0, \quad (21)$$

где  $(\Phi_{mp})^0$  — стандартное равновесное значение гальвани-потенциала для границы «раствор — металл», на которой протекает исследуемая электрохимическая реакция. Подставляя (21) в (20), находим

$$\begin{aligned} \overline{\Delta G}^\neq &= \Delta G_0^\neq + \alpha zF[\Phi_{mp} - (\Phi_{mp})^0] = \\ &= \Delta G_0^\neq + \alpha zF\varphi, \end{aligned} \quad (22)$$

где  $\varphi$  — электродный потенциал, измеряемый относительно стандартного электрода сравнения, на котором устанавливается равновесие реакции (1) в опыте погружения, и определяемый следующей формулой:

$$\varphi = [\Phi_{mp} - (\Phi_{mp})^0]. \quad (23)$$

Однако в опыте погружения равновесным является не стандартное состояние, а соответствующее потенциальному погружения, что требует корректировки уравнения (22) и преобразования его к виду

$$\begin{aligned} \overline{\Delta G}^\neq &= \Delta G_0^{*\neq} + \alpha zF[\Phi_{mp} - (\Phi_{mp})^*] = \\ &= \Delta G_0^\neq + \alpha zF(\varphi^*), \end{aligned} \quad (24)$$

где  $\Delta G_0^{*\neq}$  — энергия активации при равенстве энергетических уровней первого и второго состояний ( $\Delta G_2 = \Delta G_1$ ), а именно при равновесии реакции (1) при потенциале погружения;  $\Phi_{mp}^*$  — равновесное значение потенциала Гальвани для границы «раствор — металл» при потенциале погружения, а  $\varphi^*$  — электродный потенциал, отсчитанный от потенциала погружения.

Анализ уравнений (21)–(24) показывает, что в условиях электрохимического равновесия изменение потенциала Гальвани «раствор — металл»  $\Phi_{mp}$  всегда может быть скомпенсировано соответствующим изменением химических потенциалов веществ, принимающих участие в электрохимической реакции (1). В свою очередь закрепление потенциала Гальвани, например  $\Phi_{mp} = 0$ , гарантирует определенную энергию активации и, следовательно, скорость протекания реакции, а при потенциале погру-



жения — отсутствие направленного перехода зарядов через границу раздела фаз. При этом необходимо пояснить, что равенство нулю  $\Phi_{\text{mp}}$  не означает, что между раствором и металлом отсутствует скачок электрического потенциала, так как он в неявной форме имеется в  $\Delta G_0^*$  и  $\Delta G_0^{**}$ . Очевидно, что соотношение, аналогичное (22) и (24), может быть получено и для анодного процесса при замене коэффициента  $\alpha$  на коэффициент  $(1 - \alpha)$ . Поэтому все сказанное для катодной реакции справедливо и для анодного процесса.

Возвращаясь к потенциалу погружения, можно утверждать, что, поскольку при выводе уравнений (22) и (24) не было поставлено никаких условий относительно типа электрохимического процесса и металла электрода, это соотношение справедливо для всех электрохимических систем. И, следовательно, обращение процесса должно наблюдаться при одном и том же значении потенциала «раствор — металл»  $\Phi_{\text{mp}}$  или  $\Phi_{\text{mp}}^*$  — вне зависимости от вида металла, но при различной концентрации веществ, принимающих участие в электрохимическом процессе, что и наблюдается на практике. Помимо собственно потенциала погружения, для электрохимического анализа большую роль играет количество электричества, проходящее через гальванометр в системе «маленький электрод — большой электрод». Остановимся в следующем разделе статьи на анализе этого явления несколько подробнее.

### Влияние отклонения потенциала металлического электрода от потенциала погружения на величину количества электричества, протекающего в системе

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

$$C_{\text{в}} = 4\pi\epsilon_0 r = 4\pi 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-2} \approx \\ \approx 1,11 \cdot 10^{-12} \Phi, \quad (24)$$

где  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума. С другой стороны, при погружении этого шарика в водный раствор электролита в силу образования двойного электрического слоя его емкость уже следует рассматривать как емкость плоского конденсатора, образованного его поверхностью и поверхностью, соприкасающейся с ним электролита. Величина этой емкости может несколько изменяться, но обычно ее принимают равной  $C = 20 \text{ мКФ/см}^2 = 0,2 \text{ Ф/м}^2$ . Следовательно, емкость всего шарика в водном растворе электролита  $C_{\text{вр}}$  при сделанных предположениях составит

$$C_{\text{вр}} = 0,2 \cdot 4\pi\epsilon_0 r^2 \approx \\ \approx 2,51(10^{-2})^2 = 2,51 \cdot 10^{-4} \Phi. \quad (25)$$

Анализ соотношений (24) и (25) показывает, что  $C_{\text{вр}} \gg C_{\text{в}}$ , следовательно, при оценке количества электричества, протекающего через систему, при опытах с погружением электрода величиной  $C_{\text{в}}$  можно просто пренебречь и считать, что количество электричества, проходящее через систему, полностью определяется емкостью  $C_{\text{вр}}$ .

При этом в соответствии с теорией Нернста естественно предположить, что при потенциалах больше потенциала погружения на внутреннюю (металлическую) обкладку конденсатора поступают положительные электрические заряды. Попасть на внутреннюю обкладку конденсатора они могут, преодолев либо двойной электрический слой маленького электрода, либо двойной электрический слой большого электрода, и затем уже по металлическому проводнику через гальванометр они поступают на маленький электрод. Путь по второму варианту в силу значительно большей площади поверхности большого электрода по сравнению с площадью поверхности маленького электрода связан с меньшей поляризацией, что и обуславливает подтвержденную экспериментом практическую возможность обнаружения этого явления. Аналогичный эффект возникает и при потенциалах, меньших потенциала погружения, с той лишь разницей, что на металлическую обкладку конденсатора в этом случае поступают отрицательные электрические заряды. Следова-



тельно, при потенциале погружения переход зарядов через двойной электрический слой должен отсутствовать, что и подтверждается экспериментально. Электрический ток при периодическом смачивании металлического электрода способствует развитию коррозии энергетического оборудования в зоне ватерлинии.

В статье представлены термодинамическое и кинетическое обоснование потенциала погружения, позволяющее трактовать его как потенциал идеально неполяризующегося электрода, при котором происходит обращение электрохи-

мической реакции, определяющей электродный потенциал. В рамках предложенной модели потенциал максимума электрокапиллярной кривой характеризует идеально поляризуемый электрод, когда происходит изменение полярности двойного электрического слоя.

Наличие электрического тока при периодическом смачивании металлического электрода, особенно при потенциалах ниже потенциала погружения, — дополнительный фактор агрессивности при электрохимической коррозии металла, например при коррозии энергетического оборудования по ватерлинии в зоне брызг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Салем, Р.Р. Теоретическая электрохимия [Текст] / Р.Р. Салем.— М.: Вузовская книга, 2001.— С. 239.

2. Дамаскин, Б.Б. Введение в электрохимическую кинетику [Текст] / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий.— М.: Высшая школа, 1975.— С. 244, 290.

УДК 621

*Р.А. Леонтьев, В.А. Рассохин*

### ОСНОВНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ ГАЗОПАРОВЫХ УСТАНОВОК

Человечество удовлетворяет около 80 % своих потребностей в энергии за счет органического топлива — нефти, угля, природного газа. Доля их в балансе электроэнергетики несколько ниже — около 65 % (39 % — уголь, 16 % — природный газ, 9 % — жидкое топливо).

По прогнозам международного энергетического агентства к 2020 году при росте потребления первичных энергоносителей на 35 % доля органического топлива увеличится более чем на 90 %.

Сегодня потребности в нефти и природном газе обеспечены на 50–70 лет. Однако, несмотря на постоянный рост добычи, эти сроки в последние 20–30 лет не уменьшаются, а растут в результате открытия новых месторождений и совершенствования технологий добычи. Что касается угля, то его извлекаемых запасов хватит более чем на 200 лет.

Таким образом, нет вопроса о дефиците органического топлива. Дело заключается в том,

чтобы наиболее рационально использовать их для повышения жизненного уровня людей при безусловном сохранении среды их обитания. Это в полной мере касается электроэнергетики.

У нас в стране основным топливом для тепловых электростанций служит природный газ. В обозримой перспективе доля его будет, по-видимому, снижаться, однако абсолютное потребление электростанциями сохранится примерно постоянным и достаточно большим. По многим причинам, не всегда разумным, он используется недостаточно эффективно.

Потребителями природного газа являются как традиционные паровые турбинные теплоэлектростанции (ТЭС) и теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) в основном с давлением пара 13 и 24 МПа (их КПД в конденсационном режиме составляет 36–41 %), но также и старые ТЭЦ с существенно более низкими параметрами и высокими издержками производства.



Существенно повысить эффективность использования газа можно за счет применения газотурбинных и газопаровых технологий.

Максимальная единичная мощность газотурбинной установки (ГТУ) достигла к настоящему времени 300 МВт; КПД при автономной работе — 36–38 %, а в многовальльных ГТУ, созданных на базе авиадвигателей с высокими степенями повышения давления, — 42,6 % и более; начальная температура газов — 1300–1500 °C; степени сжатия — 20–30.

Важнейший показатель качества применяемых газотурбинных приводов и энергетических установок — их экономичность. Роль этого показателя постоянно растет, что заставляет производителей газотурбинных установок идти по пути постоянной их модернизации.

Для обеспечения практической надежности, тепловой экономичности, невысокой удельной стоимости и эксплуатационных затрат сегодня проектируют энергетические ГТУ по простейшему циклу на максимально достижимую температуру газов (она непрерывно растет) со степенями повышения давления, близкими по удельной работе и по КПД к оптимальной для комбинированных установок, в которых используется тепло отработавших в турбине газов. Компрессор и турбина расположены на одном валу. Турбомашины образуют компактный блок со встроенной камерой сгорания — кольцевой или блочно-кольцевой. Зона высоких температур и давления локализована в небольшом по размерам пространстве, число воспринимающих их деталей невелико, а сами эти детали тщательно отработаны. Эти принципы — результат многолетней эволюции конструкций.

Большая часть ГТУ мощностью менее 25–30 МВт создана на базе или по типу авиационных или судовых газотурбинных двигателей (ГТД), для которых характерны отсутствие горизонтальных разъемов и сборка корпусов и роторов с использованием вертикальных разъемов, широкое применение подшипников качения, небольшие масса и габариты. Требуемые для наземного применения и эксплуатации на электростанциях сроки службы и показатели готовности обеспечены в авиационных конструкциях с приемлемыми затратами.

При мощности более 50 МВт ГТУ проектируют специально для электростанций и выполняют одновальными с умеренными степенями сжатия и достаточно высокой температурой отработавших газов, облегчающей использование их теплоты. Для уменьшения размеров и стоимости, а также повышения экономичности ГТУ мощностью 50–80 МВт выполняют высокооборотными с приводом электрического генератора через редуктор. Обычно такие ГТУ аэродинамически и конструктивно подобны более мощным агрегатам, выполненным для прямого привода электрических генераторов с частотой вращения 3600 и 3000 об/мин. Такое моделирование повышает надежность и сокращает затраты на разработку и освоение.

Основным охладителем в ГТУ служит цикловый воздух. Системы воздушного охлаждения реализованы в сопловых и рабочих лопатках с помощью технологий, обеспечивших требуемые свойства при приемлемой стоимости. Применение для охлаждения турбин пара или воды может улучшить показатели ГТУ при тех же параметрах цикла или обеспечить дальнейшее (по сравнению с воздухом) повышение начальной температуры газов. Хотя технические основы для применения систем охлаждения с этими теплоносителями разработаны далеко не так детально, как с воздухом, их внедрение стало уже практическим вопросом.

В ГТУ освоено «малотоксичное» сжигание природного газа. Оно наиболее эффективно в камерах сгорания, работающих на предварительно подготовленной гомогенной смеси газа с воздухом при больших ( $\alpha = 2-2,1$ ) избытках воздуха и с равномерной, сравнительно невысокой (1500–1550 °C) температурой факела. При такой организации горения образование  $\text{NO}_x$  удается ограничить диапазоном 20–50 мг/м<sup>3</sup> при нормальных условиях (стандартно они относятся к продуктам сгорания, содержащим 15 % кислорода) при высокой полноте сгорания (концентрация СО меньше 50 мг/м<sup>3</sup>). Проблема заключается в сохранении устойчивости горения и близких к оптимальным условий горения при изменениях режимов. С разной эффективностью это достигается ступенчатой подачей топлива (включением/отключением тех или иных горелок или зон горения), регулировани-



ем расхода поступающего на горение воздуха и дежурным диффузионным факелом небольшой мощности.

Воспроизвести аналогичную технологию «малотоксичного» сжигания на жидким топливе значительно труднее. Однако и здесь есть определенные успехи.

Большое значение для прогресса стационарных ГТУ имеет выбор материалов и технологий формообразования, обеспечивающих длительные сроки службы, надежность и умеренную стоимость их деталей.

Детали турбины и камеры сгорания, которые омываются высокотемпературными газами, содержащими компоненты, способные вызвать окисление или коррозию, и испытывают большие механические и термические нагрузки, изготавливают из сложно-легированных сплавов на основе никеля. Лопатки интенсивно охлаждают и выполняют со сложными внутренними трактами методом точного литья, позволяющим использовать материалы и получить формы деталей, невозможные при иных технологиях. В последние годы все шире применяется литье лопаток с направленной монокристаллизацией, позволяющее заметно улучшить их механические свойства.

Поверхности наиболее горячих деталей защищают покрытиями, препятствующими коррозии и понижающими температуру основного металла [1].

Отклонение от проектной геометрии каналов решеток турбомашин под влиянием технологических и эксплуатационных факторов приводит к росту потерь энергии теплоносителя, снижению экономичности и надежности энергоблоков, изменению осевого усилия ротора, что указывает на необходимость использования высокоэффективных воздухоочистительных устройств и качественных видов топлива в ГТУ и своевременной очистки проточной части от загрязнений.

В современных энергетических ГТУ большой мощности температура отработавших в турбине газов составляет 550–640 °С. Их тепло может быть использовано для теплоснабжения или утилизировано в паровом цикле с повышением КПД комбинированной парогазовой установки до 55–58 %, что реально уже получено. Возмож-

ны и практически применяются различные сочетания газотурбинных и паровых турбинных циклов. Среди них доминируют бинарные, с подводом всего тепла в камере сгорания ГТУ, выработкой пара высоких параметров в котлоутилизаторе за ГТУ и использованием его в паровой турбине.

Для отечественной тепловой энергетики важнейшая хозяйственная задача — освоение и широкое использование газотурбинных установок с теми параметрами и показателями, которые уже достигнуты в мире. Важнейшая научная задача — обеспечение проектирования, изготовления и успешной эксплуатации этих ГТУ.

Производственными и научно-производственными объединениями России разработан широкий ряд ГТУ энергетических и ГТУ в составе газоперекачивающих агрегатов единичной мощностью от 1 до 180 МВт. При наличии заказа большинство из них в короткие сроки могут быть изготовлены для работы на газотурбинных электростанциях в автономном режиме, на газотурбинных ТЭЦ и на парогазовых ТЭС.

В состав основного оборудования ГПУ ТЭС (силовой блок) входят:

газовая турбина (ГТД) (например, MS5002E — по лицензии GE);

редуктор для передачи мощности ГТД к турбогенератору;

турбогенератор (ТГ) для ГТД;

комплексное воздухоочистительное устройство (КВОУ);

паровой котел-утилизатор двух давлений (КУ);

паровая турбина (ПТ);

конденсатор ПТ;

турбогенератор (ТГ) для ПТ;

система воздуховодов, газоходов и паропроводов;

система автоматического управления (АСУ ТП);

электрооборудование.

Разумеется, сохраняется много возможностей для дальнейшего развития ГТУ и газопаровых установок (ГПУ) и повышения их показателей. За рубежом спроектированы ПГУ, имеющие КПД 60 %, и ставится задача повышения его в обозримом будущем до 61,5–62 %. Для этого в ГТУ вместо циклового воздуха используется в качестве охладителя водяной пар



и осуществляется более тесная интеграция газотурбинного и парового циклов [2]. При этом в процессе проектирования необходимо учитывать воздействие ряда эксплуатационных факторов, оказывающих влияние на характеристики агрегатов, например изменение геометрии каналов решеток вследствие засоления (загрязнения) проточной части, возможного в ГПУ водяного удара или попадания в горячий блок холодного пара (из линии отбора), приводящих к деформациям сопл, и др.

Комбинированную установку, в которой основная часть топлива вводится в газовый контур (газовую часть), принято называть газопаровой установкой. Рассматриваемые ГПУ имеют раздельные схемы, в которых пароводяное и газообразное рабочие тела движутся по самостоятельным трактам (контурам), взаимодействуя лишь посредством теплообмена в аппаратах поверхностного типа. В схеме характерно наличие двух самостоятельных контуров, по которым раздельно циркулируют пар и газ, с использованием отходящей от газовой турбины теплоты для подогрева питательной воды. В ГПУ отходящие после турбины газы направляются в газовый подогреватель питательной воды (ГВП), где утилизируется теплота от газовой турбины.

В газопаровых установках раздельного типа основная доля топлива приходится на газовый контур. Расход топлива в паровом контуре в этих установках обычно отсутствует, а если он есть, то не превышает 15–20 % расхода топлива газового контура. Сжигание таких расходов топлива целесообразно организовать в камерах дожигания (КД), расположенных между газовой турбиной и парогенератором. Это так называемые ГПУ с КД.

ГПУ характеризуются низким расходом пара; в них  $d$  (относительный расход пара) обычно не превышает 0,20–0,22 от расхода воздуха через компрессор. В ряде случаев генерация указанного расхода пара осуществляется в котле-утилизаторе только за счет отходящей от газовой турбины теплоты и называется бинарной (БГПУ).

Незначительные удельные металло затраты и капитальные вложения, а также надежность создают объективные предпосылки для широкого использования ГТУ в различных техноло-

гических процессах, характеризующихся наличием экзотермических реакций окисления с выделением и передачей рабочему телу больших количеств теплоты.

Подачу воздуха можно осуществить как с помощью специального компрессора с приводом, так и путем отбора части расхода из циклового компрессора ГТУ.

Водяной пар соответствующих параметров, требуемый в технологических процессах, может быть генерирован в котлах-утилизаторах, установленных на выхлопе из газовой турбины или в каком-либо ином месте газовоздушного тракта.

В общем случае для сведения энергетического баланса технологического процесса с включенной в него ГТУ целесообразно осуществить дополнительный подвод теплоты от внешнего источника к рабочему телу путем сжигания топлива перед газовой турбиной или в топке котла-утилизатора.

Газопаровая установка содержит: ГТУ (рис. 4) с воздухозаборным устройством; генератор; котел-утилизатор (КУ) с подключенной к нему ГПУ; выходное устройство; регулирующую и запорную арматуру; соединительные трубопроводы. Газовая турбина разделена на две части — приводную газовую турбину компрессора и силовую турбину, последовательно соединенные газоходом, где установлены КУ с предвключенным экономайзером, которые соединены между собой дополнительным трубопроводом по пару (рис. 3).

Новой является ГПУ, которая содержит газотурбинную установку, состоящую из воздухозаборного устройства, воздушного компрессора, газовой турбины, камеры сгорания, размещенной между воздушным компрессором и газовой турбиной, генератор, а также котел-утилизатор с подключенной к нему паротурбинной установкой, выхлопное устройство, регулирующую и запорную арматуру, соединительные трубопроводы, а газовая турбина разделена по крайней мере на две части, между которыми на газоходе установлен котел-утилизатор с подключенной паротурбинной установкой.

Такая ГПУ отвечает всем трем критериям по новизне, изобретательскому уровню и промышленной применимости. На рис. 1 приведена статистика ГПУ в зависимости от КПД и мощности,

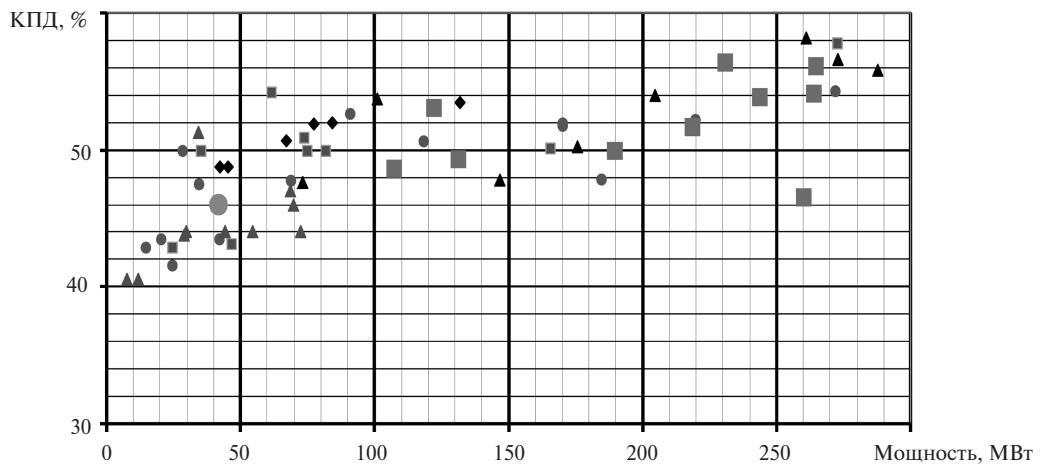


Рис. 1. Зависимость КПД ГПУ от их мощности (по данным статистики):

● — Россия; ■ — АББ; ▲ — Siemens; ■ — GE; ◆ — RR; ▲ — прочие; ● — РЭПХ

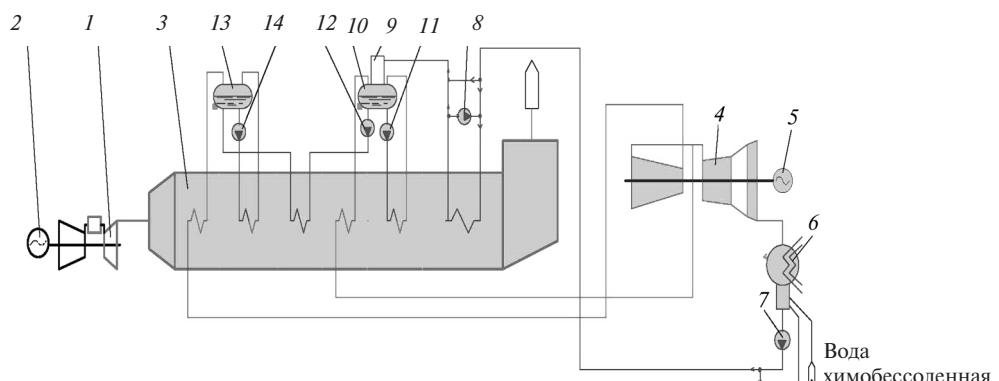


Рис. 2. Схема блока моноблочной ГПУ:  
1 — ГТУ; 2 — ТГ ГТ; 3 — КУ; 4 — ПТУ; 5 — ТГ ПТУ; 6 — конденсатор;  
7, 8, 11, 12, 14 — насосы; 9 — деаэратор; 10 — барабан НД; 13 — барабан ВД

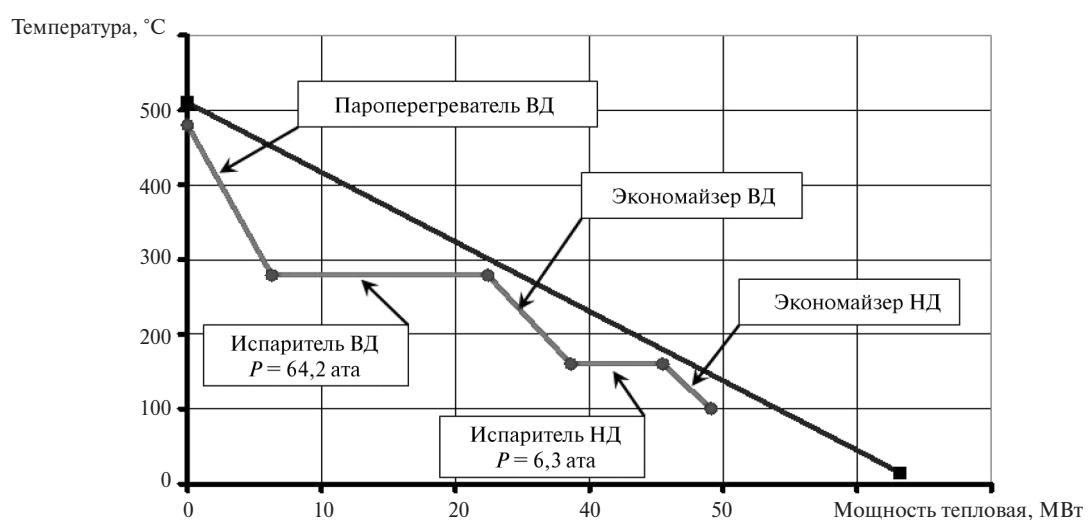


Рис. 3. Диаграмма передачи тепла в КУ с паром двух давлений  
(генератор газа — ГТД М95002Е)



Таблица 1  
Энергетические установки комбинированного цикла

Производитель, ГТ/ПТ	Модель ГТ/ ПТ	Электрическая мощность, МВт	КПД, %	Номинальная мощность ГТ/ПТ, МВт	Схема ПГУ	Эмиссия NO <sub>x</sub> , ppm
ГП НПКГ «Заря»-«Машпрорект»	GT 10000S2 (ДУ71)/ ПТ-6	16	43,0	10/6	1ГТ+1ПТ	—
	GT 15000 (ДБ90)/ ПТ-6	21,5	43,6	15/6	1ГТ+1ПТ	40
	GT 15000 (ДС90)/ ПТ-10	25	41,8	15/10	1ГТ+1ПТ	—
	GT 25000 (ДГ80)/ ПТ-10	34	47,7	25/9,7	1ГТ+1ПТ	—
	GT 15000 (ДБ90)/ К12	43	43,6	16/12	2ГТ+1ПТ	40
ФГУП ММПП «Салют»	ПГУ-26С	26	44	20/6	1ГТ+1ПТ	25
	ПГУ-60С	60	52,0	52/8	1ГТSTIG+1ПТ	25
ОАО «СМНП им. М.В. Фрунзе»	НК-16СТ/К-6-17,5	21	42	16/5	1ГТ+1ПТ	115
GE Energy	PGT10	28,3	44,5	9,5/10	2ГТ+1ПТ	—
	MS50001PA	40,0	44,0	25,8/15	1ГТ+1ПТ	—
	MS60001B	58,3	48,0	37,7/21,6	1ГТ+1ПТ	—
MAN Turbo	THM1304-11	32,92	45,5	21,52/11,4	2ГТ+1ПТ	—
	FT	32,91	49,7	24,74/8,75	1ГТ+1ПТ	—
	FT8 Twin	50,4	50,4	49,83/18,02	1ГТ+1ПТ	—
Prat&Whitney	FT8 Powerpac	32,91	49,7	24,74/8,755	1ГТ+1ПТ	—
	FT8-3 Powerpac	36,57	50,6	27,22/10,01	1ГТ+1ПТ	—
	FT8 Twinpac	66,75	50,4	49,83/18,02	1ГТ+1ПТ	—
Rolls-Royce	RB211-6562	38,7	—	26,56	1ГТ+1ПТ	—
	RB211-6761	41,9	—	29,9	1ГТ+1ПТ	—
	Trent	66,0	—	50,17	1ГТ+1ПТ	—
Siemens	SGT-400	18,0	47,6	—	1ГТ+1ПТ	25
	SGT-600	36,1	50,5	24,0/12,1	1ГТ+1ПТ	25
	SGT-700	41,3	51,1	28,4/12,9	1ГТ+1ПТ	15
Solar Turbines	Mars100/IPS30	28,7	44,0	10,7/7,31	2ГТ+1ПТ	—
	Mars100/IPS40	43,1	44,1	10,7/11,01	3ГТ+1ПТ	—
	Mars100/IPS50	57,4	44,2	10,7/14,62	4ГТ+1ПТ	—

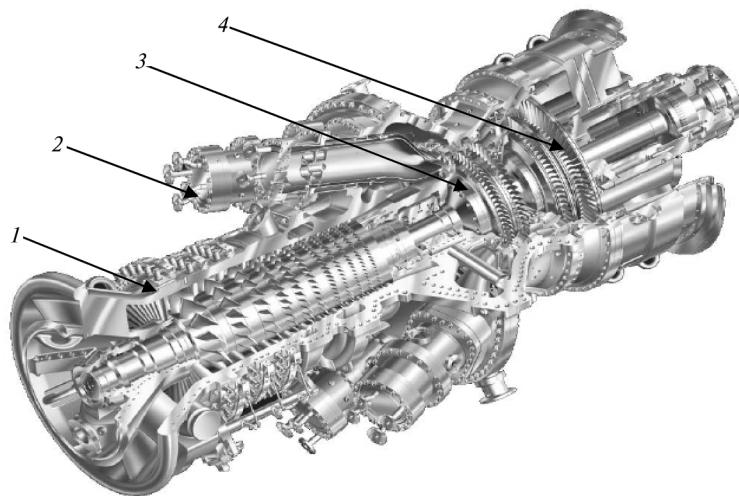


Рис. 4. Газовая турбина MS5002E по лицензии GE:

1 — компрессор; 2 — камера сгорания; 3 — турбина ВД;  
4 — свободная турбина

а в табл. 1 представлен модельный ряд ГПУ с основными параметрами .

В 2008 году ЗАО «РЭПХ» приобрело у GE Oil & Gas лицензию на производство и продажу в России ГТУ MS 5002E мощностью 32 МВт под наименованием «Ладога 32». Условиями лицензионного соглашения предусматривается поэтапная полная передача технологии изготовления газотурбинного двигателя. На сегодняшний день ЗАО «РЭПХ» производит основные узлы ГТУ, центробежный нагнетатель типа 400–21–1С, вспомогательное оборудование в составе ГТУ и предлагает российскому рынку технологически совершенное изделие для наиболее сложных условий эксплуатации в промышленности.

На заводах холдинга развернуто серийное производство ГТУ этого типа и в 2010–2011 годах выпущено еще 16 таких агрегатов для ОАО «Газпром».

ГТУ «Ладога 32» спроектирована на двух рамках: раме турбоблока и раме вспомогательных устройств (РВУ). На раме турбоблока установлен двигатель (турбоблок) с кожухом шумотеплоизоляции (КШТ). Все вспомогательное оборудование и разные ГТУ системы (системы пуска, маслоснабжения, топливного газа и продувочного воздуха, вентиляции, газообнаружения, пожаротушения и др.) расположены на РВУ,

служащей также маслобаком и находящейся в своем КШТ.

Перед расчетом схемы одноконтурной ГПУ выбираем некоторые опорные точки, определяемые либо надежностью, либо термодинамическими условиями.

Один из основных параметров — начальная температура  $t_0$  пара или — при двухконтурной ГПУ — температура пара на выходе из контура высокого давления, генерируемого котлом утилизатором. Чем она больше, тем выше КПД газопарового цикла и меньше конечная влажность. Поэтому ее следует выбирать максимально возможной, но меньше температуры уходящих газов ГТУ  $t_d$ , при этом с уменьшением разности  $\delta t_1 = t_d - t_0 = 40–50$  °С. Аналогичным образом выбираем температуру пара, генерируемого контуром низкого давления.

Вторая опорная точка — температура питательной воды  $t_{\text{п.в}}$  на входе в КУ. Исключение коррозии выходных поверхностей КУ требует иметь  $t_{\text{п.в}}$  на уровне 60 °С. Ее повышение приводит к увеличению температуры  $\theta_{\text{ух}}$  уходящих газов КУ и снижению КПД КУ, а следовательно, всей ГПУ. Тепловая схема блока представлена на рис. 2.

Третья опорная точка — давление в деаэраторе и способ его питания. Чаще всего для этой цели используется пар, генерируемый КУ.



Таблица 2

**Уровень экономичности блока ГПУ на базе ГТУ MS 5002E.  
Основные факторы, определяющие экономичность ПГУ с котлом-утилизатором**

Наименование, размерность	Диапазон (статистика)	Проект
Начальная температура газа, °C	1050–1400	1200
Температура газов за ГТУ, °C	450–625	510
Температура газов за котлом, °C	80–130	110
КПД ГТУ, %	30–41	35
КПД котла-утилизатора, %	75–90	82
Общая мощность блока ПГУ, МВт	10–800	42
КПД ПГУ, %	40–58,5	46

Таким образом, после проведения расчетов и выбора тепловой схемы определены параметры газопаровой установки на базе газотурбинного двигателя MS5002E. Определен состав и параметры элементов основного тепломеханического оборудования ГПУ ISO номинальном режиме ( $t_h = +15$  °C):

Расход газа на выходе из ГТУ

MS5002E, кг/с ..... 102  
 Температура газа в КС ГТУ, °C, ..... 1205  
 Степень сжатия ..... 17  
 Температура газа на выходе ГТУ, °C ..... 510  
 Расход топлива (природный газ), кг/с ..... 1,776  
 Мощность электрическая ГТУ, МВт ..... 30,29  
 КПД ГТУ, % ..... 34,1  
 Температура газа на выходе из КУ, °C ..... 146,6  
 КПД КУ, % ..... 73,4  
 Расход пара на выходе КУ (ВД/НД), кг/с ... 10,6/3,3

Температура пара на входе КУ  
 (ВД/НД), °C ..... 480/160  
 Мощность паровой турбины, МВт ..... 11,4  
 Мощность установки, МВт ..... 41,69  
 КПД ПГУ, % ..... 46,9

Они могут использоваться для дальнейшей расчетной и конструктивной проработки ПГУ.

Для принятых параметров и состава ГПУ суммарная электрическая мощность установки на номинальном режиме ожидается на уровне 41 МВт при КПД 46 %.

Экономичность блока ГПУ на базе ГТУ MS5002E отражает табл. 2. Составлена математическая модель данной парогазовой установки в программном комплексе DVIGwT, подтверждена ее работоспособность. Это позволяет применять ГПУ при новом строительстве и для реконструкции уже существующих ТЭС и ТЭЦ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонтьев, Р.А. Новая разработка ЗАО «РЭПХ» — модернизированная установка ГТ-32РП «Ладога» [Текст] / Р.А. Леонтьев, И.Ю. Прягаев, В.В. Спирин, А.В. Яковлев. — Турины и дизели.— 2010. № 6.

2. Толмачев, В.В. Расчет и оптимизация параметров тепловых схем ПГУ конденсационного типа с котлом-утилизатором на базе ГТУ FRAME 5.2E [Текст] / В.В. Толмачев.—

3. Дорофеев, В.М. Маслов В.Г. [и др.] Термогазодинамический расчет газотурбинных силовых уста-

новок [Текст] / В.М. Дорофеев, В.Г. Маслов [и др.].— М.: Машиностроение, 1973.— 144 с.

4. Rocker, K. Planung, Errichtung und Inbetriebnahme des Gasturbinen— Kraftwerk Riffa II [Текст] / K. Rocker // Brown Boveri Techn.— 1986.— В. 73.— No. 3.— S. 79—241.

5. Трухний, А.Д. Расчет тепловых схем парогазовых установок утилизационного типа [Текст]: Методическое пособие по курсу «Энергетические установки» / А.Д. Трухний, С.В. Петрунин.— М.: Изд-во МЭИ, 2001.— 24 с.

УДК 536.33:536.244

Н.И. Куриленко, В.И. Максимов,  
Г.Я. Мамонтов, Т.А. Нагорнова

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ С РАДИАЦИОННЫМ ИСТОЧНИКОМ НАГРЕВА

Ввиду роста тарифов на энергоресурсы одной из основных актуальных задач в обеспечении теплом производственных зданий является снижение энергозатрат. Особенность отопления таких помещений связана с тем, что они рассчитаны не только на создание комфортных рабочих условий для человека, но и на эффективное функционирование оборудования. Использование конвективного отопления для обогрева производственных помещений, цехов, складов не экономично. Современные промышленные технологии предъявляют все более сложные требования к отоплению производственных площадей. В связи с этим применение таких средств отопления, как инфракрасные обогреватели, становится все более актуальным и востребованным.

Следует отметить, что в настоящее время отсутствуют результаты теоретических и экспериментальных исследований основных закономерностей процессов теплопереноса в замкнутых объемах с локальными радиационными источниками нагрева в сопряженных постанов-

ках с учетом основных значимых факторов. Известные результаты решения задач свободной конвекции с учетом теплоотвода по внешнему контуру области моделирования [1–4] получены для условий, существенно отличающихся от условий нагрева инфракрасными излучателями. Поэтому целесообразно математическое моделирование процессов теплопереноса в замкнутых прямоугольных областях с радиационными источниками ввода энергии на одной из границ.

Цель наших исследований — математическое моделирование сопряженного теплопереноса в замкнутой прямоугольной области с локальным источником радиационного нагрева в рамках модели свободной конвекции.

### Физическая модель

Рассматривается естественная конвекция в замкнутой прямоугольной области (рис. 1). Область решения представляет собой газовую полость, ограниченную от окружающей среды теплопроводными стенками конечной толщины.

Рассматриваемая система теплоизолирована по внешнему контуру. Исследуется процесс переноса теплоты за счет механизма естественной конвекции в условиях абсолютно прозрачной газовой среды. Энергия, излучаемая нагревателями на верхней границе  $L_2$ , полностью поступает к поверхности нижней горизонтальной стенки. В результате роста температуры поверхности  $L_1$  формируются вихревые течения нагретого воздуха у этой границы.

Принимается, что в начальный момент газ и твердые стенки имеют постоянную и одинаковую во всех точках температуру, а теплофизические свойства материала твердых стен и газа не зависят от температуры, режим течения является ламинарным. Газ считается вязкой тепло-

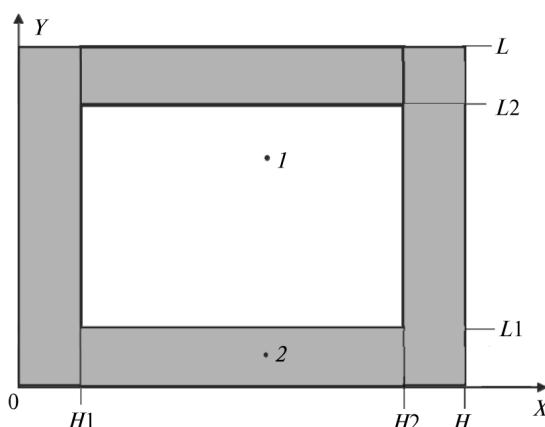


Рис. 1. Область решения рассматриваемой задачи:

1 — газ, 2 — элемент твердой стенки



проводной ньютоновской жидкостью, удовлетворяющей приближению Буссинеска.

### Математическая модель и метод решения

Процесс переноса теплоты в анализируемой области решения (см. рис. 1) описывается системой нестационарных двумерных уравнений конвекции в приближении Буссинеска [3–6] для жидкости и уравнением теплопроводности для твердых стенок. Основным в приближении Буссинеска является предположение о том, что рассматривается «слабая» конвекция: вызванные неоднородностью температуры отклонения плотности от среднего значения предполагаются настолько малыми, что ими можно пренебречь во всех уравнениях, кроме уравнения движения, где это отклонение учитывается в слагаемом с подъемной силой.

В качестве масштаба расстояния была выбрана одна из сторон рассматриваемой области решения —  $L$ . Для приведения системы уравнений к безразмерному виду использовались следующие соотношения:

$$X = \frac{x}{L}; \quad Y = \frac{y}{L}; \quad \tau = \frac{t}{t_0}; \quad U = \frac{u}{V_0}; \quad V = \frac{v}{V_0};$$

$$\Theta = \frac{T - T_0}{\Delta T}; \quad \Psi = \frac{\psi}{\psi_0}; \quad \Omega = \frac{\omega}{\omega_0};$$

$$V_0 = \sqrt{g \beta \Delta T L}; \quad \Delta T = T_{it} - T_0; \quad \psi_0 = V_0 L;$$

$$\omega_0 = \frac{V_0}{L},$$

где  $x, y$  — координаты, м;  $u, v$  — скорости по осям  $x, y$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $X, Y$  — безразмерные декартовы координаты;  $\tau$  — безразмерное время;  $t$  — время, с;  $t_0$  — масштаб времени, с;  $U, V$  — безразмерные скорости;  $V_0$  — масштаб скорости (скорость конвекции),  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\Theta$  — безразмерная температура;  $T$  — температура, К;  $T_0$  — температура газа и твердого тела в начальный момент времени, К;  $T_{it}$  — масштаб температуры, К;  $\psi$  — функция тока,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\psi_0$  — масштаб функции тока,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\Psi$  — безразмерный аналог  $\psi$ ;  $\omega$  — вихрь скорости,  $1/\text{с}$ ;  $\omega_0$  — масштаб вихря скорости,  $1/\text{с}$ ;  $\Omega$  — безразмерный аналог  $\omega$ .

Математическая постановка задачи в безразмерных переменных включает следующие уравнения:

$$\frac{1}{\text{Sh}} \frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Omega}{\partial X} + V \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = \frac{1}{\sqrt{\text{Gr}}} \Delta \Omega + \frac{1}{2} \frac{\partial \Theta}{\partial X}, \quad (1)$$

$$\Delta \Psi = -2\Omega; \quad (2)$$

$$\frac{1}{\text{Sh}} \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Theta}{\partial X} + V \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Pr} \sqrt{\text{Gr}}} \Delta \Theta; \quad (3)$$

$$\frac{1}{\text{Fo}} \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \Delta \Theta. \quad (4)$$

Начальные условия для системы уравнений (1)–(4):

$$\Psi(X, Y, 0) = \Omega(X, Y, 0) = 0; \quad (5)$$

$$\Theta(X, Y, 0) = 0.$$

Границные условия на внешних границах области решения:

$$\frac{\partial \Psi(X, Y, \tau)}{\partial Y} = 0, \quad \frac{\partial \Theta(X, Y, \tau)}{\partial Y} = 0 \quad (6)$$

$$\text{при } Y = 1, \quad 0 < x < \frac{H}{L}, \quad 0 < \tau < \frac{t}{t_0}$$

$$\text{и } Y = 0, \quad 0 < x < \frac{H}{L}, \quad 0 < \tau < \frac{t}{t_0};$$

$$\frac{\partial \Psi(X, Y, \tau)}{\partial X} = 0, \quad \frac{\partial \Theta(X, Y, \tau)}{\partial X} = 0 \quad (7)$$

$$\text{при } X = 0, \quad 0 < Y < 1, \quad 0 < \tau < \frac{t}{t_0}$$

$$\text{и } X = \frac{H}{L}, \quad 0 < Y < 1, \quad 0 < \tau < \frac{t}{t_0}.$$

На границах раздела твердых стенок и газа выполняются условия

$$\frac{\partial \Psi(X, Y, \tau)}{\partial Y} = 0, \quad \frac{\partial \Theta_1(X, Y, \tau)}{\partial Y} = \lambda_{1,2} \frac{\partial \Theta_2(X, Y, \tau)}{\partial Y},$$

$$\Theta_1(X, Y, \tau) = \Theta_2(X, Y, \tau) \quad (8)$$

$$\text{при } Y = \frac{L1}{L}, \quad \frac{H1}{L} < x < \frac{H2}{L}, \quad 0 < \tau < \frac{t}{t_0}$$

$$\text{и } Y = \frac{L2}{L}, \quad \frac{H1}{L} < x < \frac{H2}{L}, \quad 0 < \tau < \frac{t}{t_0};$$

$$\frac{\partial \Psi(X, Y, \tau)}{\partial X} = 0, \quad \frac{\partial \Theta_1(X, Y, \tau)}{\partial X} = \lambda_{1,2} \frac{\partial \Theta_2(X, Y, \tau)}{\partial X},$$

$$\Theta_1(X, Y, \tau) = \Theta_2(X, Y, \tau) \quad (9)$$

$$\text{при } X = \frac{H1}{L}, \quad \frac{L1}{L} < Y < \frac{L2}{L}, \quad 0 < \tau < \frac{t}{t_0}$$

$$\text{и } X = \frac{H2}{L}, \quad \frac{L1}{L} < Y < \frac{L2}{L}, \quad 0 < \tau < \frac{t}{t_0}.$$

На границе  $L1$  учитывается радиационный источник нагрева:

$$\frac{\partial \Psi(X, Y, \tau)}{\partial Y} = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \Theta_1(X, Y, \tau)}{\partial Y} = \frac{\partial \Theta_2(X, Y, \tau)}{\partial Y} + Ki,$$

$$\Theta_1(X, Y, \tau) = \Theta_2(X, Y, \tau)$$

$$\text{при } Y = \frac{L1}{L}, \quad \frac{H1}{L} < X < \frac{H2}{L}, \quad 0 < \tau < \frac{t}{t_0}.$$

Здесь  $Ki = qL^3 / \lambda(T_{it} - T_0)$  — число Кирпичева;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности твердой стенки,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $Gr = g\beta L^3(T_{it} - T_0) / v^2$  — число Грасгофа;  $\beta$  — температурный коэффициент объемного расширения,  $\text{К}^{-1}$ ;  $g$  — ускорение, создаваемое массовыми силами,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $L$  — длина, м;  $v$  — коэффициент кинематической вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\lambda_{1,2}$  — относительный коэффициент теплопроводности;  $Pr = v / a$  — число Прандтля;  $Fo = at_0 / L^2$  — число Фурье;  $a$  — коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Уравнения (1)–(4) с соответствующими начальными и граничными условиями (5)–(10) решались последовательно методом конечных разностей на равномерной сетке. Каждый временной шаг начинался с вычисления поля температуры в газовой полости и в элементах твердой стенки, затем решалось уравнение Пуассона для функции тока. При определении граничных условий для вектора вихря применялась формула Вудса [6]. Для решения системы разностных уравнений был использован метод прогонки [7] и схема переменных направлений. Аппроксимация конвективных составляющих рассматривалась усредненной относительно скоростей  $U$  и  $|U|$  ( $V$  и  $|V|$ ) с целью исключения зависимости рассматриваемой схемы от знака скорости [6]. Численное решение системы (1)–(10) проведено методом, разработанным для решения задач сопряженной

естественной конвекции с граничными условиями первого рода (для уравнения теплопроводности в области источника нагрева) [8, 9] и развитым на задачи теплопереноса с граничными условиями четвертого рода [10–12] в условиях больших градиентов температур и фазовых переходов.

### Анализ результатов численного моделирования

При проведении численных исследований приняты следующие значения:

безразмерные величины:  $Sh = 1$ ,  $Pr = 0,71$ ,  $Gr = 10^7$ ;

геометрические размеры  $L = 1 \text{ м}$ ,  $H = 1 \text{ м}$ . масштаб времени, соответствующий  $t_0 = 0,1 \text{ с}$ .

Контролировались условия геометрического подобия реальных систем и модели, используемой при математическом описании процесса. В результате численного решения задачи получены распределения температур для исследуемой области и изолинии функции тока, характеризующие основные закономерности рассматриваемого процесса (рис. 2).

Из рис. 2,а,б видно, что в момент времени  $\tau = 500$  в воздушной полости рассматриваемой области образуются четыре симметричных циркуляционных потока. Нагретый воздух поднимается в трех характерных областях воздушной среды до верхней твердой стенки и, охлаждаясь, опускается вдоль вертикальных стен.

Увеличение времени  $\tau$  до 1100 (рис. 2,в,г) приводит к укрупнению двух вихрей и уменьшению остальных. При этом возникшие термические возмущения начинают движение навстречу друг к другу.

Дальнейший рост временного параметра (рис. 2,д,е) приводит к вырождению более мелких и окончательному формированию двух устойчивых вихрей. Также можно наблюдать объединение термических возмущений (рис. 3).

Распределение температуры наглядно демонстрирует влияние подъемной силы, которая обусловлена неоднородностью поля температуры. Рис. 3 показывает, что температура в газовой среде распределяется существенно неравномерно из-за влияния архимедовой силы.

Численное моделирование проведено для достаточно типичных условий работы систем лучистого нагрева, например на базе инфракрас-

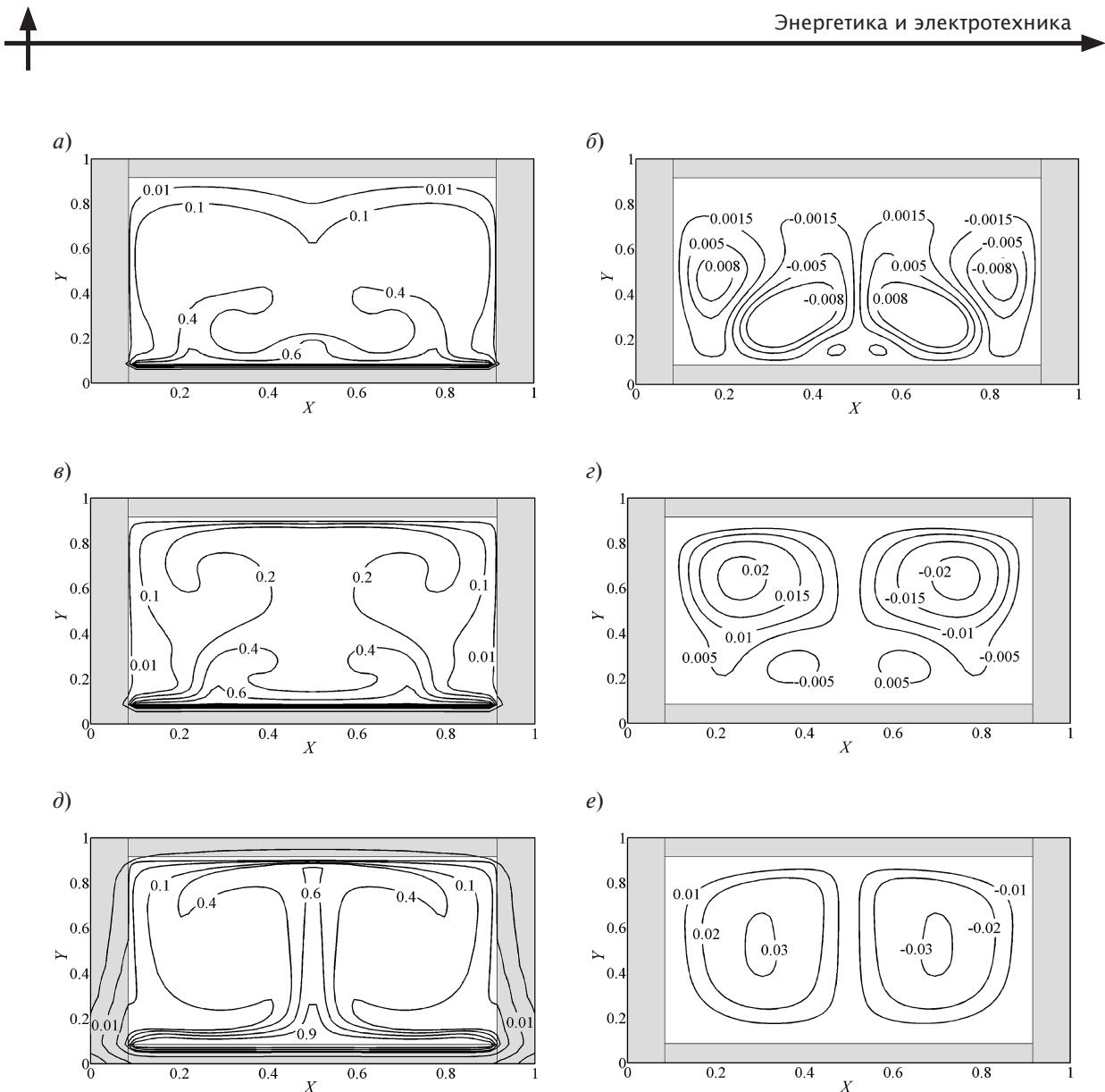


Рис. 2. Поле температур ( $a, c, d$ ) и изолинии функции тока ( $b, e$ ) для модели естественной конвекции в замкнутой области с радиационным нагревом нижней границы раздела газа и твердой стенки при  $Gr = 10^7$  для различных временных параметров:  $\tau = 500$  ( $a, b$ ),  $\tau = 1100$  ( $c, e$ ),  $\tau = 36000$  ( $d, e$ )

ных нагревателей. Поэтому полученные результаты показывают возможность применения нового подхода к описанию тепловых режимов помещений с радиационными системами отопления. В отличие от традиционных подходов [13–15] к анализу температурных полей без учета конвективных процессов, сформулированная в данной работе модель обеспечивает условия для существенно более точного описания физики теплопереноса в условиях работы систем лу-чистого нагрева производственных помещений.

Так, анализ распределений температур (см. рис. 2, 3) показывает, что градиенты этой основной характеристики теплового режима рассма-

труемого объекта достигают больших значений по двум координатным направлениям во всех характерных зонах области решения задачи. Высокая неоднородность температурных полей в рассмотренном диапазоне изменения времени обусловлена теплоотводом в ограждающие конструкции. Теплопроводность и объемная теплоемкость материала последних существенно выше аналогичных характеристик воздуха. Поэтому значительная часть теплоты отводится за счет механизма теплопроводности в ограждающие конструкции и аккумулируется. В результате температура воздуха в пристенных горизонтальных и вертикальных слоях существенно ниже, чем

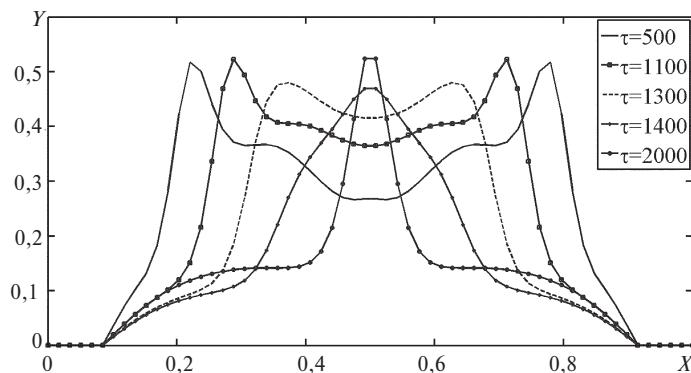


Рис. 3. Профили температуры в сечении  $Y = 0,25$  при  $Gr = 10^7$  в различные моменты времени

температуры вблизи оси симметрии области решения.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности предложенного моделирования процессов сопряженного теплообмена в объектах теплоснабжения с радиационными источниками нагрева при выборе параметров последних.

Проведено теоретическое исследование естественной конвекции в системе с радиационным источником тепла. Полученные резуль-

таты позволяют оценить характер течения и интенсивность анализируемого процесса теплопереноса, а также дают новую информацию, которая не только характеризует конвективный режим течения, но и является дополнительной для построения и апробации более сложных моделей, учитывающих реальные процессы обогрева помещений радиационными источниками.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (ГК № П2225 от 11.11.2009).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kuznetsov, G.V.** Conjugate heat transfer in an enclosure under the condition of internal mass transfer and in the presence of local heat source [Текст] / G.V. Kuznetsov, M.A. Sheremet // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2009. Vol. 52. № 1–2. — P. 1–8.
2. **Kuznetsov, G.V.** Conjugate natural convection with radiation in an enclosure [Текст] / G.V. Kuznetsov, M.A. Sheremet // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2009. Vol. 52. № 9–10. — P. 2215–2223.
3. **Кузнецов, Г.В.** Двумерная задача естественной конвекции в прямоугольной области при локальном нагреве и теплопроводных границах конечной толщины [Текст] / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет // Известия РАН. Сер.: Механика жидкости и газа. — 2006. № 6. — С. 29–39.
4. **Кузнецов, Г.В.** Сопряженный теплоперенос в замкнутой области с локально сосредоточенным источником тепловыделения [Текст] / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет // Инженерно-физический журнал. 2006. Т. 79. № 1. — С. 56–63.
5. **Лыков, А.В.** Сопряженные задачи конвективного теплообмена [Текст] / А.В. Лыков, А.А. Александров, В.А. Алексашенко. — Минск: Наука и техника, 1971. — 346 с.
6. **Пасконов, В.М.** Численное моделирование процессов тепло- и массообмена [Текст] / В.М. Пасконов, В.И. Полежаев, Л.А. Чудов. — М.: Наука, 1984. — 288 с.
7. **Самарский, А.А.** Теория разностных схем [Текст] / А.А. Самарский. — М.: Наука, 1977. — 656 с.
8. **Кузнецов, Г.В.** Об одном подходе к математическому моделированию тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры и электронной техники [Текст] / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет // Микроэлектроника. — 2008. Т. 37. № 2. — С. 150–158.
9. **Кузнецов, Г.В.** Моделирование нестационарного теплопереноса в замкнутой области с локальным источником тепловыделения [Текст] / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет // Теплофизика и аэромеханика. 2005. — Т. 12. № 2. — С. 305–314.
10. **Kuznetsov, G.V.** Problem of heat and mass transfer at the ignition of a combustible liquid a heated metal particle [Текст] / G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Journal of Engineering Thermophysics. — 2009. Vol. 18. № 1. — P. 72–79.



11. Кузнецов, Г.В. Моделирование воспламенения жидкого вещества горячей частицей [Текст] / Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Химическая физика.— 2009. Т. 28. № 5.— С. 91–98.
12. Kuznetsov, G.V. Transient heat and mass transfer at the ignition of vapor and gas mixture by a moving hot particle [Текст] / G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // International Journal of Heat and Mass Transfer.— 2010. Vol. 53. № 5–6.— P. 923–930.
- Бухмиров, В.В. Модификации зонального метода для решения задач радиационного теплообмена: основные положения [Текст] / В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников, Ю.С. Солнышкова // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2009. Вып. 2.— С. 61–63.
13. Бухмиров, В.В. Алгоритм расчета систем лучистого отопления помещений [Текст] / В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников, Ю.С. Солнышкова // Вестник Ивановского государственного энергетического университета.— 2010. Вып. 4.— С. 23–25.
14. Бухмиров, В.В. Экспериментальное исследование системы отопления и инфракрасными излучателями [Текст] / В.В. Бухмиров, Ю.С. Солнышкова, М.В. Пророкова // Вестник Ивановского государственного энергетического университета.— 2011. Вып. 3.— С. 12–16.

УДК 621. 311:621.316.925:004.312.46

А.С. Зеленин, В.Л. Кузнецов, М.Г. Попов

## РАЗРАБОТКА МИКРОПРОЦЕССОРНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНО-ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Техническое совершенство и надежность функционирования средств диагностики, автоматики и релейной защиты в основном определяются качеством входной информации. Прогрессивное развитие методов и средств релейной защиты и автоматики (РЗА) достигается при модернизации структуры, конструктивного исполнения и улучшения метрологических характеристик вторичных преобразователей (датчики) электрических сигналов тока и напряжения [1], а также при разработке функциональных алгоритмов диагностики, управления и защиты с учетом собственных динамических характеристик всех элементов измерительного тракта микропроцессорной системы. Эти направления совершенствования современных микропроцессорных устройств РЗА неизбежно связаны с многочисленными экспериментально-поисковыми исследованиями различных функциональных структур, методов, алгоритмов измерения и контроля параметров режимов работы защищаемого электрооборудования. Естественно, что значительная энергоемкость и большие затраты на

выполнение натурных физических экспериментов не позволяют провести полноценные исследования динамических свойств микропроцессорных устройств защиты и диагностики. И тогда единственным возможным способом исследования остается применение современных численных методов, реализующих адекватное математическое описание всех элементов расчетной схемы электрической сети, в том числе первичных и вторичных преобразователей электрических сигналов, которые контролируются средствами РЗА. В частности, такой подход реализуется в [1] для контроля режимных параметров электрооборудования в темпе процесса изменения электрических сигналов, что открывает возможности для разработки качественно новых функциональных алгоритмов диагностики, управления и защиты.

### Особенности разработки микропроцессорного испытательно-диагностического комплекса

Цифровая комплексная система диагностики реального времени средств РЗА электроэнер-

а)



б)

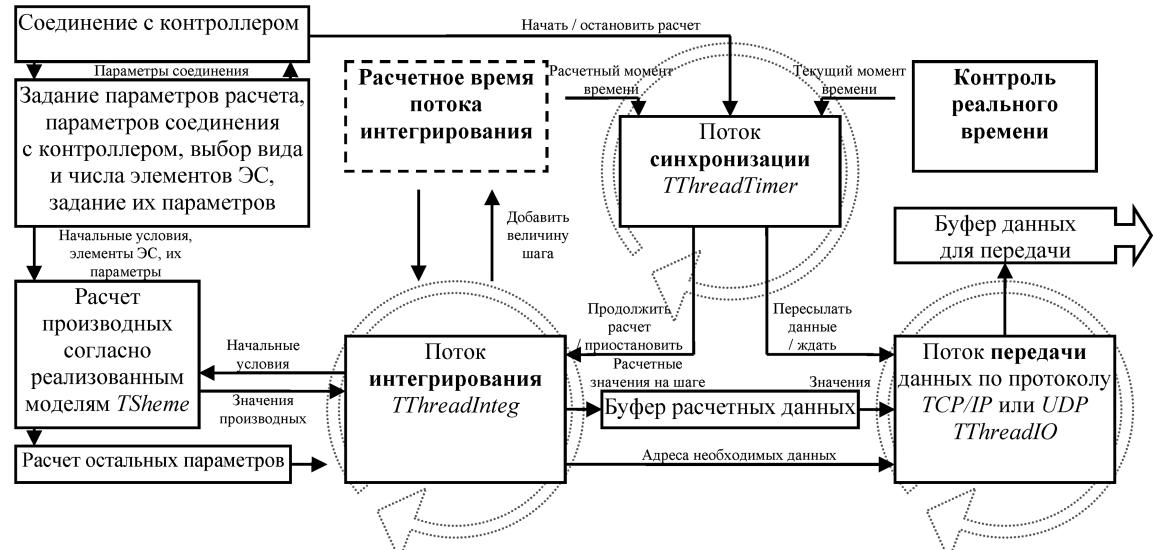
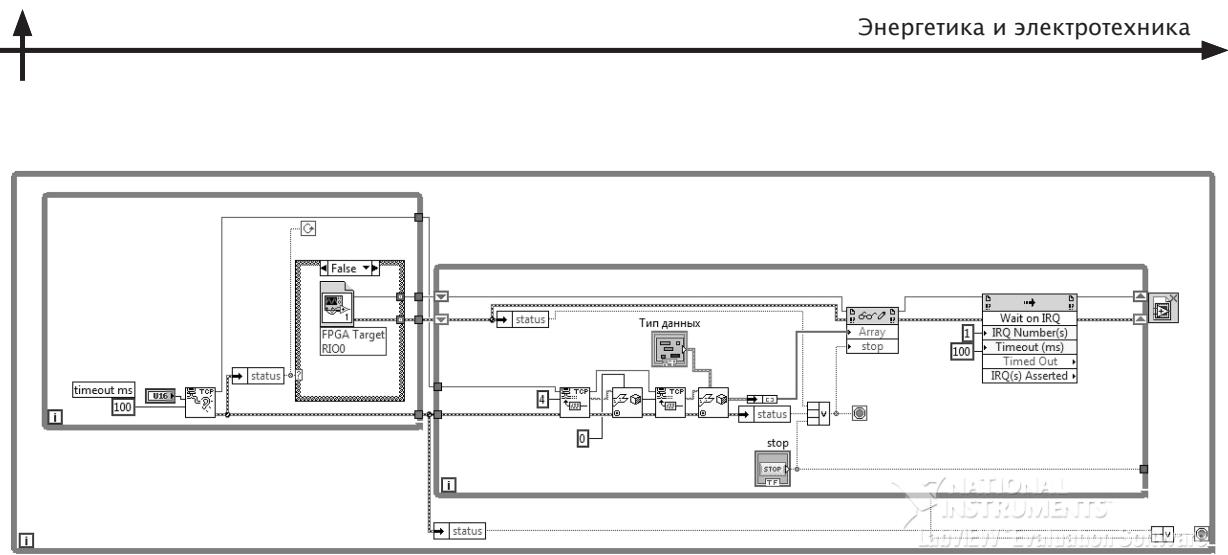


Рис. 1. Обобщенная структурная схема микропроцессорной системы (а) и алгоритм (б) прикладного программного обеспечения

гетических систем разрабатывается на базе контроллера реального времени *National Instruments CompactRIO™* и компьютера (рис. 1, а). Управляющий контроллер *FPGA* помещен на шасси программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), позволяющей с помощью разработанной авторами программы (рис. 2) передавать рассчитанные компьютером результаты на платы аналогового и дискретного вывода и за- дающие воздействия от испытуемых устройств

на компьютер через платы ввода с фиксированной частотой дискретизации.

На контроллере реального времени установлена операционная система реального времени *WindRiver VxWorks* (см. [2], с. 120). Алгоритм программы контроллера включает в себя следующие основные процедуры: инициализацию программы для ПЛИС (*FPGA*); получение данных с компьютера на контроллер посредством передачи данных по *TCP/IP* или *UDP*; преобразование

Рис. 2. Общий вид программы контроллера в среде *LABVIEW*

полученных данных; организацию тайм-аута и передачу данных на ПЛИС для последующего вывода значений.

Согласно представленной обобщенной структуре (см. рис. 1, *а*) математическое описание переходных процессов в элементах электроэнергетических систем (генераторы, трансформаторы, линии, нагрузки) реализовано в разработанном авторами прикладном программном обеспечении. Для организации пользовательского интерфейса применены независимые алгоритмы создания схем замещения элементов энергосистемы (ЭС) и сборки общей расчетной схемы (рис. 3, *б*). Задание параметров элементов осуществляется в табличной форме (см. рис. 3, *а*). Для обеспечения максимальной гибкости при создании расчетных схем произвольной конфигурации автора-

ми был разработан специальный класс объектов — *TMyMatrix*, который включает в себя методы работы с матрицами и матричными вычислениями.

Передача расчетных параметров режима работы электрической системы, а также управляемых воздействий выполняется с использованием протоколов *TCP/IP* или *UDP*.

Для обеспечения максимального быстродействия предусмотрена мультипоточность прикладного программного обеспечения (см. рис. 1, *б*). Алгоритм работы основан на взаимодействии потоков численного интегрирования (*TThreadInteg*), синхронизации (*TThreadTimer*), передачи данных *TThreadIO*. Кроме того, для тестирования передачи данных в комплекс включен вспомогательный поток приема данных (*TThreadTimerPrint* — на рисунке не показан).

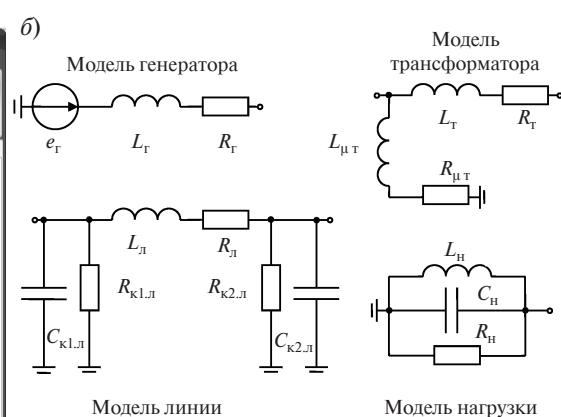
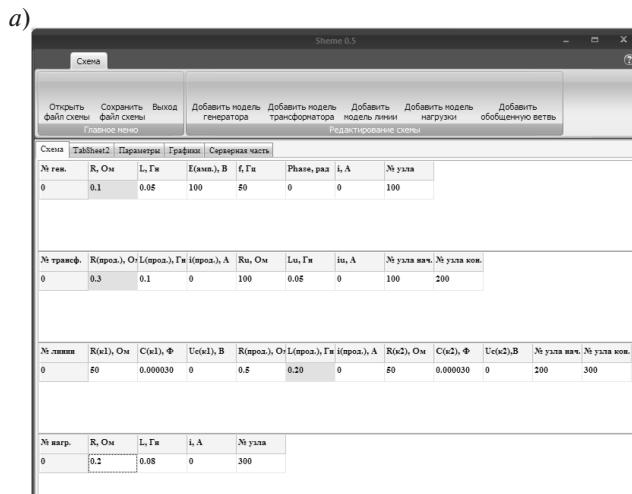


Рис. 3. Представление параметров элементов ЭС:

*а* — табличный интерфейс задания параметров элементов ЭС; *б* — схемы замещения элементов ЭС

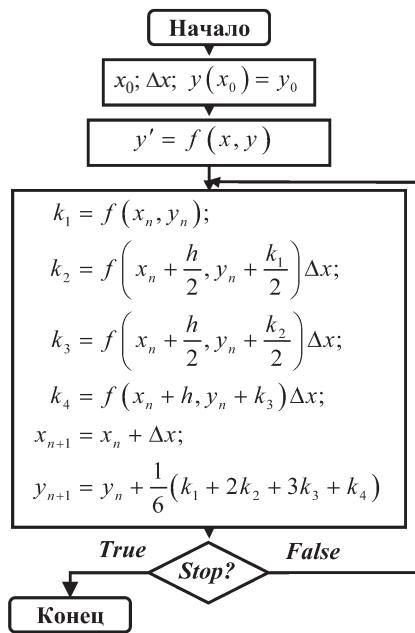


Рис. 4. Алгоритм численного интегрирования методом Рунге — Кутты 4-го порядка

В потоке *TThreadInteg* реализованы методы численного интегрирования Эйлера и Рунге — Кутты 4-го порядка с постоянным шагом (рис. 4). В этом классе есть специальный буфер, в который заносятся рассчитанные значения параметров энергосистемы на каждом шаге интегрирования. Для синхронизации потоков интегрирования *TThreadInteg* и передачи данных *TThreadIO* используется специализированный класс *TThreadTimer*, с помощью которого реализуется управление загрузкой многоядерного процессора. Реальное время вычисляется по тактам работы процессора при помощи специальной функции *WinAPI QueryPerformanceCounter*.

Вычисление производных на  $i$ -м шаге осуществляется согласно теории графов в рамках класса *TSheme*, учитывающего топологию схемы и объединяющего в себе модели отдельных элементов. Для создания графа цепи необходимо пронумеровать ветви в строго определенном порядке (см. [3], с. 55), формируя так называемые нормальные дерево и подграф. По результатам нумерации ветвей и заполнения матрицы соединений  $A$  формируются матрицы контуров  $C$  и сечений  $D$ . Их физический смысл достаточ-

но подробно описан в [3]. Составление нормального графа позволяет выделить в этих матрицах подматрицы, соответствующие паре «элемент дерева + элемент связи». К примеру, согласно [3]

$$C = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline & E_{\Delta} & C_{\Delta} & r_{\Delta} & L_{\Delta} & J_c & L_c & g_c & C_c \\ \hline J_c & F_{JE} & F_{JC} & F_{JR} & F_{JL} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline L_c & F_{LE} & F_{LC} & F_{LR} & F_{LL} & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline g_c & F_{GE} & F_{GC} & F_{GR} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline C_c & F_{CE} & F_{CC} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline \end{array}$$

где 1 — единичные матрицы, размерность которых определяется числом строк в подматрицах  $F_{ij}$ , соответствующих  $i$ -м ветвям связи и  $j$ -м ветвям дерева;  $E_{\Delta}$ ,  $C_{\Delta}$  — номера ветвей, входящих в дерево и содержащие источники ЭДС, конденсаторы и т. д.;  $J_c$ ,  $L_c$  — номера ветвей, входящих в подграф связей, содержащих источники тока, индуктивные элементы и т. д.

В [3] получены выражения для нахождения значений производных токов в катушках индуктивности ветвей связи и напряжений конденсаторов ветвей дерева:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu,$$

где  $x = \begin{bmatrix} u_{C_{\Delta}} \\ i_{L_c} \end{bmatrix}$ ;  $u = \begin{bmatrix} U_{E_{\Delta}} \\ J_c \end{bmatrix}$ ;  $A$  и  $B$  — матрицы, полученные по выражениям, приведенным ниже, с использованием вышеназванных подматриц.

$$A = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix}^{-1} \left( \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_{11} & 0 \\ 0 & H_{22} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \right);$$

$$A_{11} = -F_{GC}^T R^{-1} F_{GC};$$

$$A_{12} = F_{LC}^T - F_{GC}^T R^{-1} F_{GR} R_{\Delta} F_{LR}^T;$$

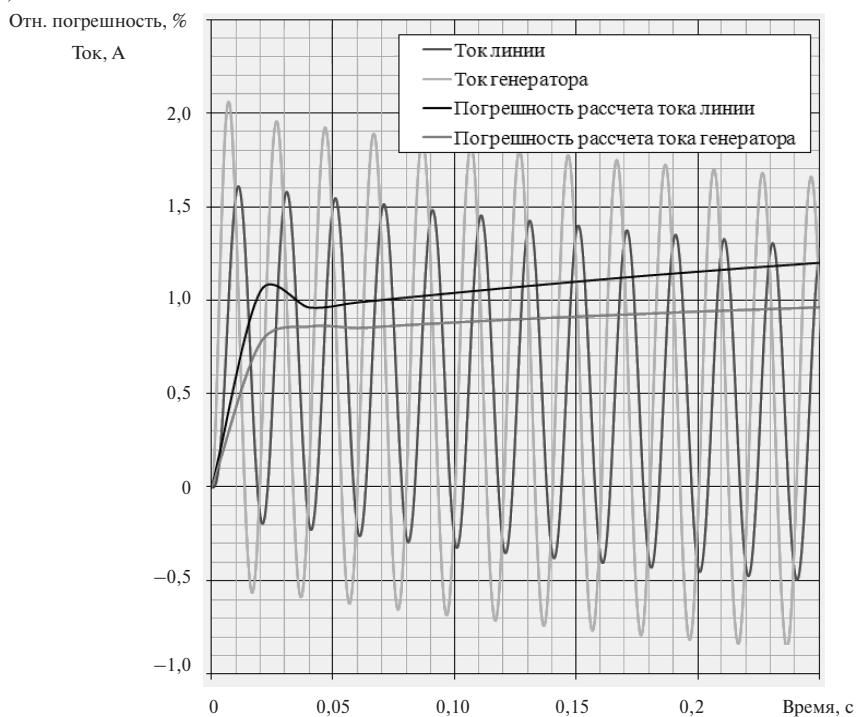
$$A_{21} = -F_{LC} + F_{LR} G^{-1} F_{GR}^T G_c F_{GC};$$

$$A_{22} = -F_{LR} G^{-1} F_{LR}^T;$$

$$H_{11} = -F_{CC}^T C_c;$$



a)



б)

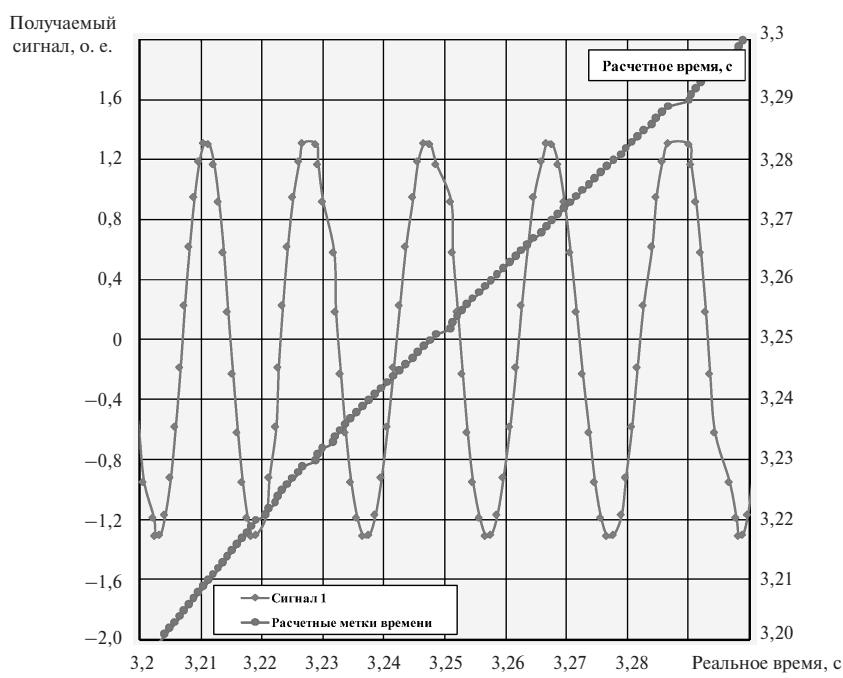


Рис. 5. Полученные осциллограммы сигналов в рамках тестирования:

- а — рассчитанные сигналы и их относительная погрешность вычисления;  
 б — проверка быстродействия в системе «компьютер — компьютер»

$$\begin{aligned}
 B_{11} &= -F_{GC}^T R^{-1} F_{GE}; \\
 B_{12} &= F_{JC}^T - F_{GC}^T R^{-1} F_{GR} R_{\Delta} F_{JR}^T; \\
 B_{21} &= -F_{LE} + F_{LR} G^{-1} F_{GR}^T G_c F_{GE}; \\
 B_{22} &= -F_{LR} G^{-1} F_{JR}^T; \\
 H_{22} &= -F_{LL} L_{\Delta\Delta} F_{JL}^T - L_{c\Delta} F_{JL}^T.
 \end{aligned}$$

Нахождение остальных токов ветвей связи и напряжений на элементах ветвей дерева осуществляется по выражениям из [3]:

$$\begin{aligned}
 u_{R_{\Delta}} &= \left( G_{\Delta} + F_{GR}^T G_c F_{GR} \right)^{-1} \left( F_{JR}^T J_c + F_{LR}^T i_{L_c} - \right. \\
 &\quad \left. - F_{GR}^T G_c F_{GE} u_{E_{\Delta}} - F_{GR}^T G_c F_{GC} u_{C_{\theta}} \right); \\
 i_{G_c} &= \left( R_c + F_{GR} R_{\Delta} F_{GR}^T \right)^{-1} \left( -F_{GE} u_{E_{\Delta}} - F_{GC} u_{C_{\Delta}} - \right. \\
 &\quad \left. - F_{GR} R_{\Delta} F_{JR}^T J_c - F_{GR} R_{\Delta} F_{LR}^T i_{L_c} \right); \\
 u_{L_{\Delta}} &= \frac{d}{dt} \left[ L_{\Delta\Delta} \left( F_{LJ}^T J_c + F_{LL}^T i_{L_c} \right) + L_{\Delta c} i_L \right]; \\
 i_{C_c} &= \frac{d}{dt} C_{cc} \left( -F_{CE} u_{E_{\Delta}} - F_{CC} u_{C_{\Delta}} \right).
 \end{aligned}$$

Полный набор токов и напряжений ветвей вычисляется с применением матриц  $C$  и  $D$ :

$$i = C^T \begin{vmatrix} i_{J_c} \\ i_{L_c} \\ i_{G_c} \\ i_{C_c} \end{vmatrix} - J; \quad u = D^T \begin{vmatrix} u_{E_{\Delta}} \\ u_{C_{\Delta}} \\ u_{R_{\Delta}} \\ u_{L_{\Delta}} \end{vmatrix} + E,$$

где  $J$  и  $E$  — матрицы мгновенных значений токов и напряжений соответствующих источников.

#### Апробация микропроцессорного испытательно-диагностического комплекса

Тестирование расчетного алгоритма производилось сравнением значений токов и напряжений, полученных комплексом путем числен-

ного интегрирования методом Рунге — Кутты 4-го порядка при шаге 0,0001 с и полученных в среде *MATLAB Simulink* с использованием такого же метода интегрирования и шага. На рис. 5, а приведена зависимость относительной погрешности вычисления сигналов от времени для схемы «генератор — трансформатор — линия — нагрузка».

Тестирование быстродействия программного обеспечения осуществлялось в системе «компьютер (сервер) — компьютер (клиент)». Сервер осуществляет прием данных от клиента (то есть сервер несет функцию контроллера) и присваивание метки времени полученным данным. Клиент выполняет расчет согласно алгоритмам комплекса с использованием синхронизации и пересыпает полученные результаты серверу. Кроме того, клиент добавляет к результатам свое внутреннее расчетное время.

Для тестирования передачи данных в комплекс включен вспомогательный поток приема данных по *TCP/IP*. Поток включает в себя таймер, построенный на функции *WinAPI Query PerformanceCounter*, что позволяет ему при получении данных переносить их с соответствующей меткой времени на график. Поток предназначен для тестирования стабильности работы потока передачи данных и комплекса в целом в условиях «компьютер — компьютер».

Полученный результат тестирования быстродействия в схеме «генератор — трансформатор — линия — нагрузка» для одного из шести сигналов в квазиустановившемся режиме работы представлен на рис. 5, б.

В заключение отметим, что предложенная цифровая комплексная система диагностики реального времени дает возможность разрабатывать и проектировать без привлечения реального оборудования принципиально новые средства и алгоритмы защиты и противоаварийной автоматики. Это позволит повысить экономичность, скорость разработки и промышленной реализации новых микропроцессорных устройств РЗА.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ванин, В.К.** Повышение эффективности дифференциальных защит энергетического оборудования [Текст] / В.К. Ванин, М.Г. Попов, С.О. Попов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2011. № 3. — С. 50–55.
2. National Instruments Corporation. LabVIEW и CompactRIO: основы разработки приложений [Текст] / National Instruments. — 2008. — 305 с.
3. **Демирчян, К.С.** Теоретические основы электротехники [Текст]: учебник для вузов в 3 т. / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. — 4-е изд., доп. для самостоят. изучения курса. — М. — СПб.: Питер, 2003. — Т. 2. — 575 с.



УДК 621.45

Г.А. Ноздрин, А.Ю. Абакшин, М.И. Куколев

## УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕМОВ ПРИ РАСЧЕТЕ ДВИГАТЕЛЕЙ С ВНЕШНИМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ ПО ЦИКЛУ ШМИДТА

Создано большое количество маломощных модельных двигателей с внешним подводом теплоты (ДВПТ), работающих по циклам, близким к циклу Стирлинга. Однако конструкций мощностью в десятки и сотни кВт, выпускаемых серийно, — единицы. Остается актуальной задача совершенствования существующих расчетных моделей и методик для получения более точных значений основных параметров ДВПТ (прежде всего — большой мощности) на ранних стадиях проектирования.

Совершенствованием моделей и расчетных методик ДВПТ занимались в разные годы Ю.В. Красивский, В.С. Кукис, А.Я. Коган, В.И. Евенко, И.М. Приходько, С.И. Ефимов, А.И. Лушпа и другие исследователи. К сожалению, сегодня многие из их работ труднодоступны или вовсе утрачены.

При предварительных расчетах ДВПТ в подавляющем большинстве случаев используется цикл Шмидта. Однако он недостаточно точно описывает реальные конструкции двигателей, и полученные результаты расчетов затруднительно использовать в дальнейшем, при конструировании.

Одно из направлений уточнения цикла Шмидта — учет постоянных объемов с разной температурой рабочего тела (РТ) в них.

В расчете по циклу Шмидта [1, 2] используются три характерных объема ДВПТ: сжатия, расширения и «мертвый» (рис.1). При этом в цилиндрах задается температура сжатия и расширения, а температура мертвого объема рассчитывается так:

$$T_D = \frac{T_E - T_C}{2}, \quad (1)$$

где  $T_D$  — температура в мертвом объеме;  $T_E$  — температура в цилиндре расширения;  $T_C$  — температура в цилиндре сжатия.

В реальных ДВПТ, как правило, кроме этого присутствуют:

нагреватель и холодильник постоянных объемов с температурами, отличными от температуры мертвого объема;

надпоршневые объемы, образующиеся из-за зазора между крышками цилиндров и поршнями в верхней мертвой точке (ВМТ) (рис. 2).

Для учета указанных полостей предлагается внести в цикл Шмидта ряд изменений.

В уравнение массы РТ

$$M_T = \frac{pV_e}{RT_E} + \frac{pV_c}{RT_C} + \frac{pV_D}{RT_D} = \frac{KV_e}{2RT_C}, \quad (2)$$

где  $M_T$  — суммарная масса РТ;  $p$  — давление;  $R$  — газовая постоянная РТ;  $V_e$  — объем цилиндра расширения;  $V_c$  — объем цилиндра сжатия;  $V_D$  — мертвый объем;  $K$  — постоянная, добавим члены, соответствующие дополнительным полостям, и тогда получим

$$M_T = \frac{pV_e}{RT_E} + \frac{pV_c}{RT_C} + \frac{pV_D}{RT_D} + \frac{pV_{Hot}}{RT_{Hot}} + \frac{pV_{Col}}{RT_{Col}} + \frac{pV_{eUP}}{RT_{eUP}} + \frac{pV_{cUP}}{RT_{cUP}} = \frac{KV_E}{2RT_C}. \quad (3)$$

Здесь  $V_{Hot}$  — объем нагревателя;  $V_{Col}$  — объем холодильника;  $V_{eUP}$  — надпоршневой объем цилиндра расширения;  $V_{cUP}$  — надпоршневой объем

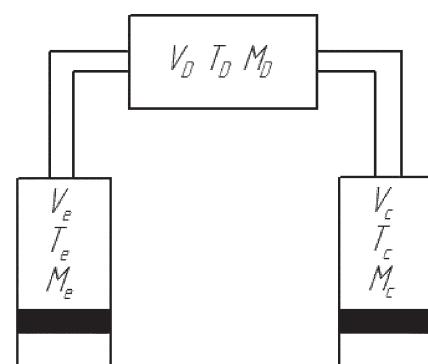


Рис. 1. Условная схема цикла Шмидта

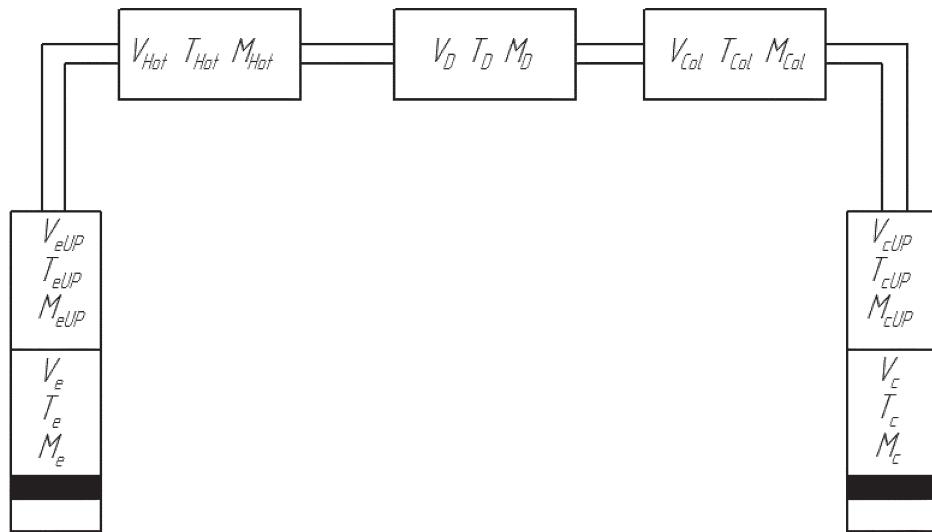


Рис. 2. Предлагаемая «улучшенная» схема

ем цилиндра сжатия;  $T_{Hot}$  — температура нагревателя;  $T_{Col}$  — температура холодильника;  $T_{eUP}$  — температура надпоршневого объема цилиндра расширения;  $T_{cUP}$  — температура надпоршневого объема цилиндра сжатия.

Тогда, учитывая что

$$V_e = \frac{1}{2}V_E(1 + \cos \varphi), \quad (4)$$

$$V_c = \frac{1}{2}V_C(1 + \cos(\varphi - \alpha)), \quad (5)$$

где  $V_E$  — максимальный объем цилиндра расширения;  $V_C$  — максимальный объем цилиндра расширения;  $\varphi$  — угол поворота коленчатого вала (ПКВ);  $\alpha$  — угол опережения изменения объемов, преобразовываем (3) к виду

$$\begin{aligned} \frac{K}{p} &= \frac{T_C}{T_E}(1 + \cos \varphi) + r(1 + \cos(\varphi - \alpha)) + \dots \\ &\dots + \frac{2V_D T_C}{V_E T_D} + \frac{2V_{Hot} T_C}{V_E T_{Hot}} + \frac{2V_{Col} T_C}{V_E T_{Col}} + \\ &+ \frac{2V_{eUP} T_C}{V_E T_{eUP}} + \frac{2V_{cUP} T_C}{V_E T_{cUP}}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $r$  — отношение объемов.

Введем некоторые обозначения:  
отношение температур в нагревателе

$$\tau_{Hot} = \frac{T_C}{T_{Hot}}; \quad (7)$$

отношение температур в холодильнике

$$\tau_{Col} = \frac{T_C}{T_{Col}}; \quad (8)$$

отношение температур в надпоршневом объеме цилиндра расширения

$$\tau_{eUP} = \frac{T_C}{T_{eUP}}; \quad (9)$$

отношение температур в надпоршневом объеме цилиндра сжатия

$$\tau_{cUP} = \frac{T_C}{T_{cUP}}; \quad (10)$$

приведенный объем нагревателя

$$S_{Hot} = \frac{V_{Hot}}{V_E}; \quad (11)$$

приведенный объем холодильника

$$S_{Col} = \frac{V_{Col}}{V_E}; \quad (12)$$

приведенный объем надпоршневой полости цилиндра расширения

$$S_{eUP} = \frac{V_{eUP}}{V_E}; \quad (13)$$

приведенный объем надпоршневой полости цилиндра сжатия

$$S_{cUP} = \frac{V_{cUP}}{V_E}. \quad (14)$$



Теперь представим (6) в виде

$$\begin{aligned} \frac{K}{p} = & \tau(1 + \cos \varphi) + r(1 + \cos(\varphi - \alpha)) + \\ & + 2S + 2S_{Hot} \tau_{Hot} + \dots + 2S_{Col} \tau_{Col} + \\ & + 2S_{eUP} \tau_{eUP} + 2S_{cUP} \tau_{cUP}. \end{aligned} \quad (15)$$

Используя серию преобразований, описанных в [1], представим (15) в виде

$$\begin{aligned} \frac{K}{p} = & \left( \tau^2 + 2\tau r \cos \alpha + r^2 \right)^{0,5} \cos(\varphi - \Theta) + \\ & + \tau + r + 2S + 2S_{Hot} \tau_{Hot} + \dots \\ & \dots + 2S_{Col} \tau_{Col} + 2S_{eUP} \tau_{eUP} + 2S_{cUP} \tau_{cUP}. \end{aligned} \quad (16)$$

Пусть

$$A = \left( \tau^2 + 2\tau r \cos \alpha + r^2 \right)^{0,5}; \quad (17)$$

$$\begin{aligned} B = & \tau + r + 2S + 2S_{Hot} \tau_{Hot} + 2S_{Col} \tau_{Col} + \\ & + 2S_{eUP} \tau_{eUP} + 2S_{cUP} \tau_{cUP}. \end{aligned} \quad (18)$$

Как можно видеть из (17) и (18), все внесенные изменения вошли в постоянную  $B$ . Таким образом, все прочие уравнения цикла Шмидта можно использовать без изменения, заменив  $B$ .

Если температуры РТ в цилиндре расширения, надпоршневом объеме цилиндра расширения и нагревателе принять одинаковыми и равными  $T_E$ , а температуры в цилиндре сжатия, надпоршневом объеме цилиндра сжатия и хо-

лодильнике равными  $T_C$ , то полученные зависимости можно существенно упростить.

Исходное уравнение (3) примет вид

$$\begin{aligned} M_T = & \frac{pV_e}{RT_E} + \frac{pV_c}{RT_C} + \frac{pV_D}{RT_D} + \frac{pV_{Hot}}{RT_E} + \frac{pV_{Col}}{RT_C} + \\ & + \frac{pV_{eUP}}{RT_E} + \frac{pV_{cUP}}{RT_C} = \frac{KV_E}{2RT_C}. \end{aligned} \quad (19)$$

Учитывая (4) и (5), представим (19) в виде

$$\frac{K}{p} = \frac{T_C}{T_E} (1 + \cos \varphi) + r(1 + \cos(\varphi - \alpha)) + \dots$$

$$\dots + \frac{2V_D T_C}{V_E T_D} + \frac{2T_C (V_{Hot} + V_{eUP})}{V_E T_E} + \frac{2(V_{Col} + V_{cUP})}{V_E}. \quad (20)$$

Введем обозначения:

приведенный горячий объем

$$X = \frac{V_{Hot} + V_{eUP}}{V_E}; \quad (21)$$

приведенный холодный объем

$$Y = \frac{V_{Col} + V_{cUP}}{V_E}. \quad (22)$$

Теперь представим (20) в виде

$$\begin{aligned} \frac{K}{p} = & \tau(1 + \cos \varphi) + r(1 + \cos(\varphi - \alpha)) + \\ & + 2S + 2X\tau + 2Y. \end{aligned} \quad (23)$$

Используя серию преобразований, описанных в [1], представим (23) в виде

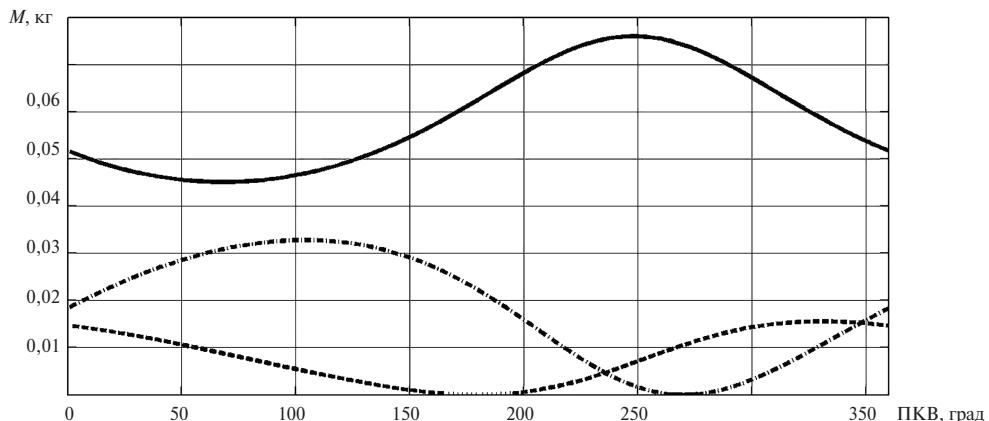


Рис. 3. Распределение масс при расчете по циклу Шмидта

(— — — —  $Mc$ ; — —  $Md$ ; - - -  $Me$ )

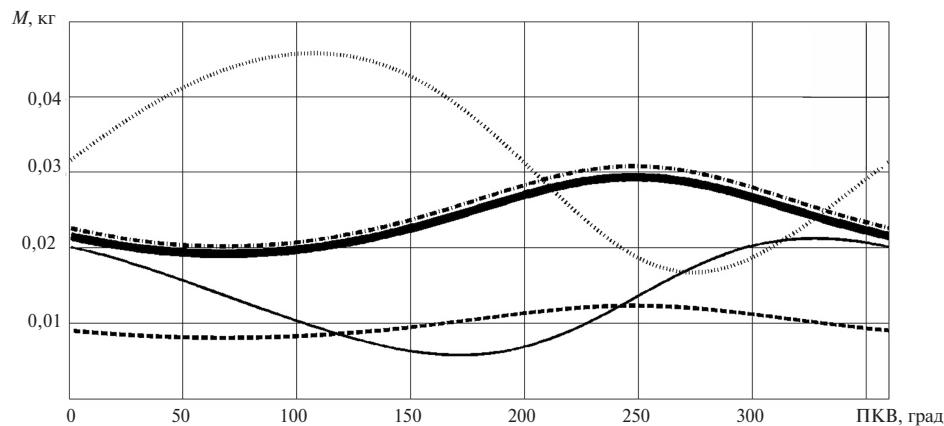


Рис. 4. Распределение масс при расчете по предложенной методике  
(……—  $M_C$ ; ——  $M_E$ ; ·····—  $m_C$ ; ·····—  $m_E$ ; ——  $M_d$ )

$$\frac{K}{p} = \left( \tau^2 + 2\tau r \cos \alpha + r^2 \right)^{0,5} \cos(\varphi - \Theta) + \\ + \tau + k + 2S + 2X\tau + 2Y. \quad (24)$$

В результате постоянная  $B$  примет вид

$$B = \tau + r + 2S + 2X\tau + 2Y. \quad (25)$$

В качестве иллюстрации на рис. 3 и 4 представлены графики, показывающие количество РТ в полостях при расчете по циклу Шмидта и по предложенной методике.

Учет полостей постоянного объема с различной температурой позволяет расширить возможности применения цикла Шмидта и приблизить расчет к конструкциям существующих ДС. В результате получается более подробная информация о распределении масс РТ в объемах ДС, результаты более эффективно используются в качестве исходных данных для термодинамического расчета ДС.

Учет надпоршневых объемов также позволяет использовать результаты для дальнейших расчетов без ошибок, связанных с «нулевыми» массой РТ и объемами цилиндров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уокер, Г. Двигатели Стирлинга [Текст] / Г. Уокер.— М.: Машиностроение, 1985.— 407 с.
2. Ридер, Г. Двигатели Стирлинга [Текст] / Г. Ридер, Ч. Хупер.— М.: Мир, 1986.— 464 с.

УДК 621.312

*А.В. Сысоев, С.В. Смоловик*

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАССТАНОВКИ ИСТОЧНИКОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Снижение потерь электроэнергии в электроэнергетических системах путем рационального распределения потоков реактивной мощности и оптимизации режимов напряжения, даже на

единицы процентов, экономит огромные финансовые средства. За счет изменения распределения потоков реактивной мощности по линиям происходит значительное улучшение параметров



режима работы сети (повышаются значения напряжения, уменьшается ток в линиях).

Значительный вклад в разработку названного направления внесли такие российские ученые-исследователи, как И.В. Жежеленко [7], Ю.С. Железко [8], Ф.Ф. Карпов [9], Б.И. Кудрин [10], Н.А. Мельников [11], В.С. Образцов [12], Б.В. Папков [13], А.В. Праховник [14], Л.А. Солдаткина [15]. Общие вопросы оптимизации режимов электрических сетей рассмотрены в работах Д.А. Арзамасцева [16], В.А. Веникова [17], В.И. Идельчика [18], Ф.Ф. Карпова [9] и Л.А. Солдаткиной [15].

В статье представлены результаты применения системного подхода к компенсации реактивной мощности в сети. В основе подхода лежит анализ изменения потерь активной мощности в сети в зависимости от мощности установленных в ней источников реактивной мощности (ИРМ).

В первой части описываются основные принципы расстановки ИРМ. Во второй — приведено подробное описание самого алгоритма с иллюстрацией его работы. В третьей части исследуется работа предложенного алгоритма на тестовой расчетной схеме энергосистемы.

### Основные принципы расстановки ИРМ

Источники реактивной мощности необходимо устанавливать как можно ближе к потребителю, чтобы избежать передачи реактивной мощности по сетям. В идеале у каждого потребителя должен стоять свой регулируемый источник реактивной мощности, обеспечивающий заданные значения коэффициента мощности и напряжения. Очевидно, что технико-экономические критерии определяют другие алгоритмы расстановки ИРМ, которые приводят к установке источников большей единичной мощности в наиболее влияющих узлах сети. В итоге возможен некоторый проигрыш в потерях, так как отдельные линии остаются загруженными реактивным током, но вместе с тем появляется возможность осуществлять скоординированное регулирование, обеспечивающее приемлемые характеристики для совокупности режимов сети.

Основными критериями расстановки ИРМ являются уменьшение перетоков реактивной мощности, обеспечение нормативных значений

напряжения у потребителей и снижение потерь в сети. Снижение потерь — косвенный признак достижения максимального использования пропускной способности сети. Поэтому одним из используемых критериев служит максимальное снижение потерь при минимальной мощности устанавливаемых ИРМ.

При установке ИРМ в сети, кроме перераспределения потоков реактивной мощности по линиям, может происходить повышение общего уровня напряжения в узлах энергосистемы. При неизменной мощности нагрузки повышение напряжения приведет к уменьшению тока в линиях, что в свою очередь обеспечит снижение потерь в сети. Но повышение напряжения в сети возможно также за счет регулирования на электрических станциях или использования РПН на трансформаторах, что в конечном счете тоже приведет к уменьшению потерь. Таким образом, для правильной оценки эффективности установки источников реактивной мощности в сети необходимо следить за напряжениями в узлах сети: значения не должны отличаться от допустимых величин.

Наряду с выдачей реактивной мощности в некоторых узлах может потребоваться ее потребление, т. е. установка регулируемых потребителей. Но чаще всего, поскольку реактивная мощность большинства потребителей носит индуктивный характер, в сети требуется установка именно источников реактивной (индуктивной) мощности. Поэтому в данной статье будет рассмотрена только расстановка ИРМ.

Современная вычислительная техника позволяет производить большое количество расчетов, к тому же, в частности в программе расчета установившегося режима (RastrWin) есть возможность написания пользовательских процедур для реализации тех или иных алгоритмов изменения режимов. По этим причинам переход всех возможных вариантов установки ИРМ и дальнейший выбор из них варианта, удовлетворяющего заданным критериям, — вполне разрешимая задача. При написании этой статьи использовался именно такой метод.

### Алгоритм расстановки ИРМ

Алгоритм основан на том, что на каждом шаге расчета установившегося режима работы сети находится узел, в котором установка ис-



точника реактивной мощности обеспечивает наибольшее снижение потерь.

На первом этапе расчета определяется минимальная единичная величина источника реактивной мощности  $Q_{ирм}$ , которая будет устанавливаться в сеть на каждом шаге; она непосредственно влияет на точность расчетов. Если ее задать большой, установленные источники реактивной мощности будут сосредоточены в нескольких узлах, и в этом случае будет наблюдаться значительная загрузка линий реактивным током. При малом значении  $Q_{ирм}$  все установленные ИРМ будут равномерно распределены по узлам сети, что также нежелательно: стоимость установки и дальнейшая эксплуатация оборудования малой единичной мощности будут значительно дороже. Единичную мощность ИРМ рекомендуется выбирать отдельно в каждом конкретном случае в зависимости от поставленной задачи и расчетной схемы сети. При выборе  $Q_{ирм}$  также рекомендуется основываться на линейке мощностей устанавливаемого оборудования и классов напряжения исследуемой сети.

Для разных классов напряжения сети  $Q_{ирм}$  рекомендуется выбирать из следующих диапазонов:

1–6 МВАр для сети 6–10 кВ;

5–15 МВАр для сети 35 кВ;

25–50 МВАр для сети 110 кВ.

После выбора  $Q_{ирм}$  начинается процедура расстановки: посредством прямого перебора находятся все возможные варианты установки источников реактивной мощности  $Q_{ирм}$  в сети.

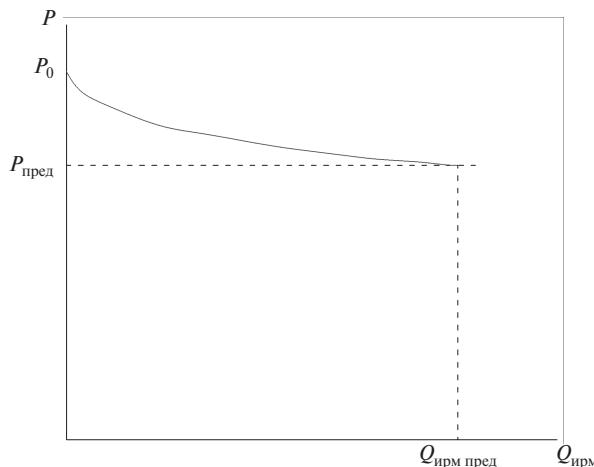


Рис. 1. Зависимость потерь активной мощности в сети от установленной мощности ИРМ

В зависимости от схемы количество рассматриваемых вариантов установки может достигать десятков, сотен и тысяч. В каждом случае рассчитывается режим и определяется величина потерь активной мощности.

Далее выбирается тот вариант, при котором потери в сети минимальны, что свидетельствует о том, что в выбранный узел необходимо установить ИРМ в первую очередь. Значение реактивной мощности ИРМ в узле фиксируется на уровне  $Q_{ирм}$ , а затем повторяется процедура установки  $Q_{ирм}$  в каждый узел и так же находится место установки очередного источника.

Данную процедуру повторяют до тех пор, пока потери не начнут расти. В этом случае сеть будет полностью обеспечена реактивной мощностью, дальнейшая установка ИРМ не требуется.

Установка источников реактивной мощности приводит к повышению уровня напряжения в сети. В результате расстановки ИРМ значения напряжения в некоторых узлах могут быть значительно выше первоначальных или даже превысить наибольшее рабочее. Последнее недопустимо. Для учета необходимого ограничения предлагается для каждого узла задать предельное значение напряжения  $U_{пред}$ , при достижении которого будет наложен запрет на установку ИРМ в этот узел на последующих шагах расчета. Как показывают численные эксперименты, величину  $U_{пред}$  целесообразно выбрать на 1–3 % выше значения напряжения на подстанциях в первоначальном режиме (в пределах допустимых значений). Данное ограничение, с одной стороны, не приведет к значительному повышению уровня напряжения во всей сети, с другой, — указанного допуска вполне достаточно для стабильной работы программы.

В результате расчетов будет получен ряд значений  $P_{пот}$  потерь мощности в зависимости от суммарной установленной реактивной мощности источников во всех узлах сети (рис.1). Так как на каждом шаге расчета был выбран случай с минимальными потерями, то при каждом  $Q_{источ}$  получен режим с наименьшими потерями в сети среди всех возможных вариантов расстановок ИРМ. Таким образом, источники данной единичной мощности использованы наиболее эффективно.

Значение  $P_0$  на графике соответствует первоначальным потерям — без установленных ИРМ.



Значение  $Q_{\text{ИРМ пред}}$  показывает то максимальное значение мощности ИРМ, при котором достигаются наименьшие потери в сети  $P_{\text{пред}}$ .

Эффект от установки источников реактивной мощности будет проявляться в следующем: стабилизации уровней напряжения; уменьшении активных потерь в сети; уменьшении токов в линиях.

За основные расчетные случаи при разработке установившихся режимов принимают режимы зимнего и летнего максимума, зимнего и летнего минимума. Для всех этих режимов аналогичным способом могут быть получены зависимости потерь активной мощности от установленной мощности ИРМ. На их основе можно для дальнейших расчетов получить зависимость средних потерь от установленной мощности ИРМ:

$$P_{\text{ср}}(Q_{\text{ИРМ}}) = \frac{A}{4},$$

где

$$A = (P_{\text{зим max}}(Q_{\text{ИРМ}}) + P_{\text{зим min}}(Q_{\text{ИРМ}}) + P_{\text{лет max}}(Q_{\text{ИРМ}}) + P_{\text{лет min}}(Q_{\text{ИРМ}})).$$

Вид графика  $P_{\text{ср}}(Q_{\text{ИРМ}})$  такой же, как показано на рис. 1.

При расстановке источников реактивной мощности допустимо производить расчеты для двух характерных режимов: максимальных нагрузок и минимальных нагрузок. В этом случае величина средних потерь вычисляется следующим образом:

$$P_{\text{ср}}(Q_{\text{ИРМ}}) = \frac{(P_{\text{max}}(Q_{\text{ИРМ}}) + P_{\text{min}}(Q_{\text{ИРМ}}))}{2}.$$

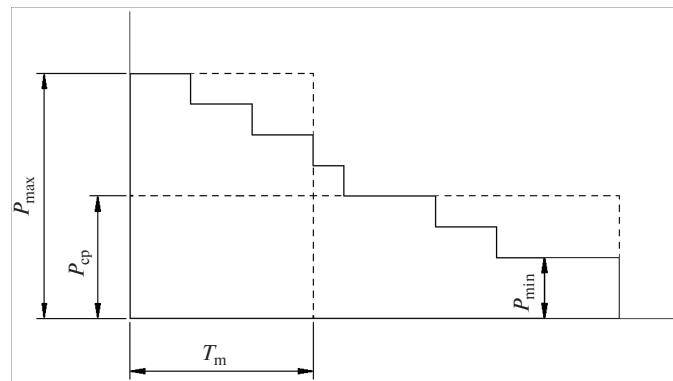


Рис. 2. Расчет потребления электроэнергии в год на основании графика нагрузки

Дальнейший шаг расчетов — определение требуемого к установке количества ИРМ. Расчеты проводятся на основе полученной зависимости  $P_{\text{ср}}(Q_{\text{ИРМ}})$  и технико-экономического анализа.

**Оценка требуемого к установке количества ИРМ.** Обычно в электроэнергетике для расчета потребления электроэнергии используются максимальная мощность  $P_{\text{max}}$  и время максимальной нагрузки  $T_{\text{m}}$ . В данном случае неизвестен график нагрузки, но зато известно, каковы максимальное и минимальное потребление; отсюда можно найти среднюю мощность. И если умножить на полное количество часов в году (8760 часов), то получается потребление электроэнергии в год.

Из рис. 2 видно, что с помощью величины средней мощности находится приблизительно та же площадь прямоугольной фигуры, что и при расчетах с использованием  $P_{\text{max}}$  и  $T_{\text{m}}$ . Тогда потребление электроэнергии в год получается равным

$$W = P_{\text{ср}} \cdot 8760, \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Эффект от применения источников реактивной мощности в установившихся режимах проявляется в виде снижения потерь активной мощности в сети. Снижение потерь обуславливает экономию денежных средств, затрачиваемых на транспортировку электроэнергии по сетям, что в конечном счете должно покрыть затраты на установку оборудования ИРМ.

По официальным данным рыночная стоимость электроэнергии на оптовом рынке в 2011



году составляет 0,9 руб/кВт·ч; тогда экономия  $\mathcal{E}$  от установки ИРМ равна

$$\mathcal{E} = \Delta P_{\text{ср}} \cdot 8760 \text{ ч} \cdot 0,9 \text{ руб/кВт·ч},$$

где  $\Delta P_{\text{ср}}$  — потери в режиме при установленных ИРМ за вычетом потерь в первоначальном режиме.

В качестве источника реактивной мощности рассматривается нерегулируемая конденсаторная батарея.

Заметим, что устройство, позволяющее регулировать выработку реактивной мощности (например, конденсаторная батарея с подключенным параллельно ей управляемым шунтирующим реактором), могло бы улучшить свойства сети не только в установленныхся режимах, но и в переходных. Однако в данной статье рассматриваются только установленныеся режимы и эффект регулирования не учитывается.

Стоимости источников реактивной мощности в соответствии с [4] следующие:

1) конденсаторная батарея 110 кВ, 27,2 Мвар (в ценах 2000 года) — 7 500 тыс. р;

2) конденсаторная батарея 110 кВ, 27,2 Мвар (в ценах 2011 года, К = 4,87 в соответствии с информационно-аналитическим бюллетенем «Индексы цен в строительстве», издаваемым КО-инвест) — 36525 тыс. р.

Исходя из этого удельную стоимость ИРМ можно принять равной 1342,8 тыс. р/МВАр, а затраты  $\mathcal{Z}$  на установку оборудования в зависимости от  $Q_{\text{ИРМ}}$  составят

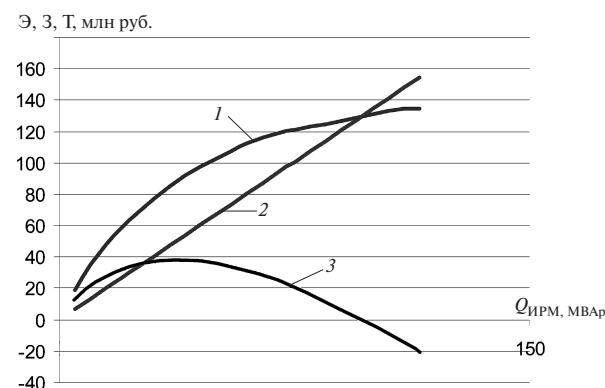


Рис. 3. Зависимости экономических показателей от установленной мощности ИРМ:

- 1 — экономия на потерях (за 14 лет);
- 2 — затраты на установку оборудования;
- 3 — эффективность установки (за 14 лет)

$$3 = Q_{\text{ИРМ}} \cdot 1,343 \text{ млн руб.}$$

В отрасли электроэнергетики используется оборудование со средним сроком эксплуатации не менее 25–30 лет. Срок окупаемости  $T_{\text{окуп}}$  для электроэнергетики обычно принимается 14 лет. Тогда эффективность  $I$  может быть рассчитана следующим образом:

$$I = \mathcal{E} T_{\text{окуп}} - 3.$$

По представленным графикам (рис. 3) видно, что характер кривой затрат на установку оборудования прямолинейно-возрастающий: при увеличении установленной мощности ИРМ пропорционально меняются и затраты на их установку. График экономии также растет с увеличением установленной мощности ИРМ, но вид его уже не прямолинейный.

Имея график экономии, можно определить коэффициент эффективности установки источников реактивной мощности — он равен производной от экономии на потерях по  $Q_{\text{ИРМ}}$ . Для некоторых значений  $Q_{\text{ИРМ}}$  (указанны в скобках в приведенных ниже выражениях) получаются следующие коэффициенты эффективности  $K_{\text{эфф}} = \frac{d\mathcal{E}}{dQ_{\text{ИРМ}}}$ :

$$K_{\text{эфф}}(5) = 3,83;$$

$$K_{\text{эфф}}(50) = 1,06;$$

$$K_{\text{эфф}}(100) = 0,28.$$

Видно, что при малых значениях  $Q_{\text{ИРМ}}$  коэффициент эффективности наибольший, т. е. установка первых источников реактивной мощности дает большую экономию на потерях, чем последующая. Это еще раз доказывает, что установка ИРМ произведена наиболее оптимальным образом, ИРМ в первую очередь устанавливают в те узлы, где существует наибольшая потребность в реактивной мощности.

Исходя из представленных графиков определяется количество ИРМ, требуемое к установке в сети. Точка пересечения кривой эффективности и оси абсцисс соответствует  $Q_{\text{ИРМ, эффектив}}$ , т. е. мощности ИРМ, необходимой к установке.

Таким образом, определяется количество ИРМ, которое необходимо поставить в сети.



Этот расчет носит оценочный характер, и при дальнейших расчетах экономическая эффективность может измениться как в худшую, так и в лучшую сторону: с одной стороны, в узлах будет установлено оборудование той мощности, которая выпускается в промышленности, и расстановка не обязательно будет соответствовать оптимальной; с другой стороны, часть ИРМ может быть установлена в виде конденсаторных батарей на шинах подстанций 6–10 кВ, стоимость которых ниже, чем заложенная в расчетах.

**Окончательная расстановка ИРМ в сети.** Расстановка источников реактивной мощности в сети рассчитывается для различных режимов, в которых нагрузка, а также коэффициент мощности могут значительно отличаться. Поэтому целесообразные места установки ИРМ будут различаться.

Последний этап после вычисления необходимого количества ИРМ ( $Q_{\text{ИРМ, эф}}$ ) — окончательное определение места установки ИРМ на основании экспертной оценки и расчетов в различных режимах. В итоге места установки ИРМ в каждом расчетном режиме несколько изменятся по сравнению с результатами расчета, выполненного по предложенному алгоритму. Это в свою очередь приведет к некоторому повышению потерь электроэнергии в сети и незначительному увеличению срока окупаемости.

#### Пример использования алгоритма расстановки ИРМ для района сети

**Краткая характеристика сети.** Применение описанного выше алгоритма расстановки источников реактивной мощности проиллюстрируем на примере энергосистемы. Системообразующие линии исследуемой сети выполнены на напряжении 110–220 кВ. От трансформаторных подстанций 110 кВ происходит питание распределительной сети 35 кВ и далее сети 6 кВ. Сеть 6 кВ в принятой расчетной схеме представлена только шинами за трансформаторами. Сети более низких классов напряжения не представлены.

Питание потребителей осуществляется от расположенных в рассматриваемом энергорайоне двух электрических станций с установленной мощностью 430 и 400 МВт. Связь с энергосистемой осуществляется по двум линиям 220 кВ и шести линиям 110 кВ.

Наиболее очевидная проблема данной сети — это неоптимальная загрузка линий реактивной мощностью, что приводит к повышенным потерям и сниженным напряжениям у потребителей. Оптимизация режима с точки зрения уровней напряжения может быть выполнена с помощью расстановки в сети источников реактивной мощности. Наиболее сложным является вопрос о размещении ИРМ на подстанциях различных классов напряжения.

Напряжение на электростанциях в соответствии с исходными данными задано на уровне:

120,93 кВ и 232,18 кВ у первой электростанции;

119,72 кВ и 226,24 кВ у второй электростанции.

Регулирование осуществляется за счет возбуждения генераторов, подключенных к шинам станций. Поэтому пределы регулирования напряжения в данных узлах ограничены.

Если рассматривать напряжения в узлах, в которых имеется нагрузка, то ситуация оказывается неоднозначной: на некоторых подстанциях, расположенных достаточно далеко от электрических станций, напряжение на 10 % ниже номинального. Расстановку ИРМ целесообразно начинать именно с таких подстанций, чтобы обеспечивался необходимый уровень напряжения. На подстанциях, которые расположены близко к электростанциям, противоположная ситуация — напряжение выше номинального; поэтому здесь количество устанавливаемых ИРМ должно быть меньше.

Исходный баланс мощности в этой системе отражен в табл. 1.

**Расстановка ИРМ в сети.** В рассматриваемой сети была произведена расстановка источников реактивной мощности в соответствии с изложенным выше алгоритмом в двух режимах: зимнего максимума и летнего минимума. Результаты сведены в табл. 2.

Как видно из таблицы, потери активной мощности в режиме зимнего максимума снижаются на 1,47 МВт, летнего минимума — на 0,97 МВт.

Места установки ИРМ во многих случаях при разных расчетных режимах совпадают. Для окончательной расстановки необходимо проанализировать возможность переноса некоторых источников в соседние узлы.

Таблица 1

## Баланс мощности в рассматриваемом районе

Режим	Генерация		Нагрузка		Потери	
	$P$ , МВт	$Q$ , МВАр	$P$ , МВт	$Q$ , МВАр	$P$ , МВт	$Q$ , МВАр
Зимний максимум	677	444	657	292	19,68	152
Летний минимум	361	317	353	286	8,25	30,8

Таблица 2

## Результаты расстановки ИРМ в сети

Суммарная установленная мощность ИРМ, МВАр	Потери активной мощности в сети, МВт		
	Режим зимнего максимума	Режим летнего минимума	Среднее значение потерь
0	19,6825	8,25308	13,9678
5	19,4582	8,13057	13,7944
10	19,2827	8,01965	13,6512
15	19,142	7,92655	13,5343
20	19,0323	7,84195	13,4371
25	18,9226	7,76884	13,3457
30	18,8275	7,7059	13,2667
35	18,7448	7,64775	13,1963
40	18,6781	7,59416	13,1361
45	18,6245	7,545	13,0847
50	18,5719	7,50141	13,0366
55	18,521	7,46105	12,991
60	18,4731	7,42807	12,9506
65	18,4303	7,39577	12,913
70	18,4006	7,37665	12,8886
75	18,3745	7,36106	12,8678
80	18,3506	7,34915	12,8499
85	18,3343	7,33782	12,8361
90	18,3076	7,32709	12,8173
95	18,28	7,31693	12,7985
100	18,2535	7,30736	12,7804



Окончание табл. 2

Суммарная установленная мощность ИРМ, МВАр	Потери активной мощности в сети, МВт		
	Режим зимнего максимума	Режим летнего минимума	Среднее значение потерь
105	18,2281	7,29837	12,7633
110	18,2108	7,28996	12,7504
115	18,2108	7,28525	12,748
120	—	7,28525	—

На рис. 4 представлены зависимости потерь активной мощности от установленной мощности ИРМ. На основании этих зависимостей получены графики экономии на потерях, затрат на установку оборудования, эффективности установки ИРМ от суммарной установленной мощности ИРМ (рис. 5).

По полученным графикам можно видеть, что в сеть необходимо установить ИРМ суммарной мощностью около 100 МВАр. При этом потери

активной мощности в режиме летнего минимума составляют 7,34 МВт, в режиме зимнего максимума — 18,34 МВт. Основные параметры режима представлены в табл. 3.

Подведем итоги.

Во многих сетях, в том числе и в рассматриваемой, имеется дефицит реактивной мощности, который требуется покрыть за счет установки дополнительных источников реактивной мощности.

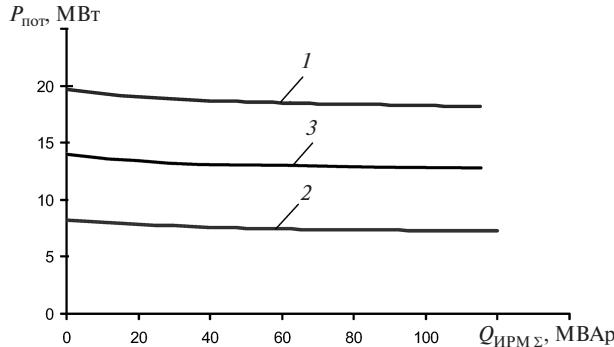


Рис. 4. Зависимость потерь активной мощности в сети от суммарной установленной мощности ИРМ в различных режимах:  
1 — режим зимнего максимума; 2 — режим летнего минимума; 3 — среднее значение

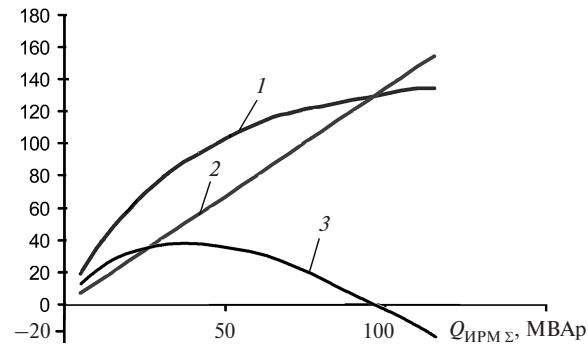


Рис. 5. Зависимость экономических показателей от установленной мощности ИРМ:  
1 — экономия на потерях (за 14 лет); 2 — затраты на установку оборудования; 3 — эффективность установки ИРМ (за 14 лет)

Таблица 3

#### Баланс мощности в рассматриваемом районе при установленных ИРМ

Режим	Генерация		Нагрузка		Потери	
	$P$ , МВт	$Q$ , МВАр	$P$ , МВт	$Q$ , МВАр	$P$ , МВт	$Q$ , МВАр
Зимний максимум	675	431	657	292	18,34	138
Летний минимум	360	308	353	287	7,34	21



Был предложен алгоритм расстановки источников реактивной мощности, основанный на переборе вариантов установки: из всех возможных выбирается наиболее эффективный с точки зрения критерия минимизации потерь.

Описанный алгоритм был опробован на схеме электрической сети и показал свою эффективность.

В зависимости от режимов (зимний максимум и летний максимум) и условий снижение потерь для рассматриваемой схемы составило 1,47 и 0,97 МВт.

Установка ИРМ суммарной мощностью 100 Мвар экономически оправдана и в течение 14 лет должна себя окупить.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евдокуин, Г.А. Электрические системы и сети [Текст]: Учебное пособие для студентов электроэнергетических специальностей вузов / Евдокуин Г.А.—СПб: Изд-во М.П. Сизова, 2004.— 304 с.
2. Беляев, А.Н. Основы переходных процессов в электроэнергетических системах [Текст]: Метод. указ. по курсовому проектированию / Сост.: А.Н. Беляев, С.Е. Герасимов, Р.В. Окороков, Г.А. Першиков, С.В. Смоловик, В.С. Чудный.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2007.— 36 с.
3. СО 153—34.20.118. Методические рекомендации по проектированию развития энергосистем [Текст].— М., 2003.
4. Справочник по проектированию электроэнергетических сетей [Текст] / Под ред. Д.Л. Файбисовича.— М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2005.
5. Управляемые подмагничиванием электрические реакторы [Текст] / Сб. статей под ред. доктора техн. наук А.М. Брянцева.— М.: Знак, 2004.
6. Информационно-аналитический бюллетень «Индексы цен в строительстве» [Текст] / КО-инвест.
7. Жежеленко, И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях [Текст] / И.В. Жежеленко.— М.: Энергоатомиздат, 1986.
8. Железко, Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях [Текст] / Ю.С. Железко.— М.: Энергоатомиздат, 1989.
9. Карпов, Ф.Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях [Текст] / Ф.Ф. Карпов.— М.: Энергия, 1975.
10. Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий [Текст] / Б.И. Кудрин, В.В. Прокопчик.— Минск: Вышэйшая школа, 1988.
11. Образцов, В.С. Системы АСКУЭ разработки АББ [Текст] / В.С. Образцов // Промышленная энергетика.— 1995. № 12.
12. Папков, Б.В. Оценки удельного ущерба от нарушений электроснабжения промпредприятий [Текст] / Б.В. Папков // Промышленная энергетика. 1993. № 3.
13. Праховник, А.В. Энергосберегающие режимы энергоснабжения горнодобывающих предприятий [Текст] / А.В. Праховник, В.П. Рогозин, В.В. Дегтярев.— М.: Недра, 1985.
14. Солдаткина, Л.А. Электрические сети и системы [Текст] / Л.А. Солдаткина.— М.: Энергия, 1978.
15. Арзамасцев, Д.А. АСУ и оптимизация режимов энергосистем [Текст]: Учебное пособие / Д.А. Арзамасцев.— М.: Высшая школа, 1983.
16. Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах [Текст] / В.А. Веников.— М.: Высшая школа, 1978.— 415 с.
17. Идельчик, В.И. Электрические системы и сети [Текст]: Учебник для вузов / В.И. Идельчик.— М.: Энергоатомиздат, 1989.

УДК 620.9

П.Ю. Михеев, А.В. Тананаев

## МЕТОДИКА ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЖИЗНЕННЫХ ЦИКЛОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Главная задача электроэнергетической отрасли на ближайшую и долгосрочную перспективу — не допустить ограничения экономического роста и обеспечить бесперебойное

энергоснабжение всех потребителей, имея для этого достаточную мощность генерирующих установок и сетевых устройств и надежное управление ими.



В настоящее время годовое потребление электроэнергии в России составляет  $\approx 10^9$  кВт·ч, а к 2030 году согласно прогнозам оно вырастет до  $2 \cdot 10^9$ – $3 \cdot 10^9$  кВт·ч. Мировое потребление электроэнергии сейчас —  $20 \cdot 10^9$  кВт·ч, а к 2030 году по имеющимся прогнозным оценкам составит  $30 \cdot 10^9$  кВт·ч [1, 8]. Основная доля потребляемых энергоресурсов приходится на топливо: нефть, газ и уголь [1, 8].

Указанные объемы потребления электроэнергии могут быть получены на базе использования различных источников. Согласно данным за 2011 год на тепловых электростанциях (ТЭС) производилось 67,6 % всей вырабатываемой электроэнергии, на атомных электростанциях (АЭС) — 13 %. Доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в мировом производстве электроэнергии составляла 19,4 %. При этом на долю крупной гидроэнергетики приходилась подавляющая часть этого вклада — 16,1 %, а на долю нетрадиционных ВИЭ (ветровые электростанции, солнечные электростанции и т. д.) — 3,3 % [8].

В практике использования такого многочисленного и разнообразного состава источников энергии возникает проблема их оптимального выбора (или их сочетания).

Основными критериями для выбора наиболее эффективных вариантов энергетических объектов (электростанций), далее — просто объектов, являются минимум денежных затрат на получение электроэнергии и наименьший срок их окупаемости. Чем ниже затраты и меньше срок окупаемости, тем вариант считается эффективнее. Однако основные методы оценки экономической эффективности не учитывают всех затрат материальных и трудовых ресурсов, необходимых для создания, эксплуатации и снятия объектов с эксплуатации. Кроме того, они достаточно сложны и трудоемки: с их помощью нельзя быстро произвести определение, сопоставление и анализ эффективности различных энергетических объектов.

В современных условиях все более важное значение приобретают экономия и рациональное использование энергии и природных ресурсов, а также энергоэффективность проектируемых объектов. Очевидно бессмысленны электростанции, на создание которых уйдет больше энергии, чем они выработают электроэнергии за свой срок эксплуатации [3].

В мировой практике для определения энергоэффективности объектов и систем активно внедряются новые методы анализа, которые позволяют получать более полную оценку эффективного использования ресурсов [5–7]. Отметим, что в данных методах определяется не минимум денежных затрат, а минимум затрат эксергии на единицу выработанной электроэнергии.

Эксергия базируется на законах классической термодинамики. Термодинамика использует такие понятия, как температура  $T$ , давление  $P$ , теплота  $Q$ , работа  $W$ , внутренняя энергия  $U$ , энтропия  $S$ . В ней сформулированы два основных закона.

*Первый закон термодинамики* является обобщением закона сохранения и превращения энергии для термодинамической системы. Он формулируется следующим образом: изменение  $\Delta U$  внутренней энергии неизолированной термодинамической системы равно разности между количеством теплоты  $Q$ , переданной системе, и работой  $W$ , совершенной системой над внешними телами [3]:

$$\Delta U = Q - W.$$

Соотношение, выражющее первый закон термодинамики, можно также записать в другой форме:

$$Q = \Delta U + W,$$

т. е. количество теплоты, полученное системой, идет на изменение ее внутренней энергии и совершение работы над внешними телами. Согласно этому закону энергия не может быть создана или уничтожена. Она передается от одной системы к другой и превращается из одной формы в другую.

*Второй закон термодинамики* (закон возрастания энтропии) дает понятие энтропии через теплоту:

$$dS \geq 0; \quad dS_{\text{обратим проц}} = 0;$$

$$dQ = T dS.$$

Первый закон не может определить потери работы и потенциальные улучшения или эффективное использование ресурсов. Второй закон свидетельствует, что для некоторых форм энергии только часть энергии переходит в работу, т. е. в эксергию [4, 6].



Упоминание об этой функции впервые появилось в 1873 году в трудах классика естествознания Дж. Гиббса. Условие термодинамического равновесия вещества, с окружающей средой, которая имеет постоянное давление  $p_0$  и температуру  $T_0$ , выражается следующим образом [3]:

$$\Delta(U + p_0V - T_0S) = 0,$$

где  $\Delta$  обозначает вариацию, являющуюся результатом любых изменений и состояний рассматриваемого тела.

Условие устойчивого равновесия сводится к тому, что значение выражения в скобках должно быть минимальным. Полное изменение энергии тела  $\Delta U$  при изменении его состояния складывается из трех частей — произведенной над телом работы внешнего источника  $A$ ; из работы, произведенной средой; из полученного от среды тепла [3]:

$$\Delta U = A + p_0V - T_0\Delta S = 0.$$

Поскольку объем среды вместе с телом остается неизменным, то  $\Delta V_0 = -\Delta V$ . В силу закона возрастания энтропии  $\Delta S + \Delta S_0 \geq 0$  (энтропия теплоизолированного источника работы не меняется), так что  $\Delta S_0 > -\Delta S$  [3].

Поэтому

$$A \geq \Delta U + p_0\Delta V - T_0\Delta S; \quad (1)$$

$$A_{\max} = -\Delta(U + p_0V - T_0S). \quad (2)$$

Если над телом, находящимся во внешней среде, не производится никакой работы, то в нем будут происходить самопроизвольные необратимые процессы, приводящие его в равновесие со средой. Тогда формулу (1) можно переписать в виде

$$(\Delta U + p_0\Delta V - T_0\Delta S) \leq 0. \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что в результате происходящих с телом процессов величина  $\Delta U + p_0\Delta V - T_0\Delta S$  будет убывать до тех пор, пока в равновесии она не достигнет минимума.

Во многих работах, где использовалась описанная выше функция, ее именовали «технической работоспособностью» или просто «рабочей способностью», а в 1953 году З. Рант предложил использовать для ее обозначения термин «эксергия». В настоящее время термин эксергия принят почти повсеместно в мировой технической литературе.

Согласно современной трактовке эксергией называется максимальная работа, которую система производит при обратимом переходе в состояние полного равновесия с окружающей средой [3].

Ниже в табл. 1 приведены основные различия между энергией и эксергией.

Таблица 1

**Основные различия между энергией и эксергией [4, 5, 6]**

Энергия	Эксергия
Зависит только от параметров материального и энергетического потока и не зависит от параметров окружающей среды	Зависит как от параметров материального или энергетического потока, так и от параметров окружающей среды
Имеет значения, отличные от нуля	Равна нулю (в состоянии равновесия с окружающей средой)
Подчиняется первому закону термодинамики во всех процессах	Подчиняется первому закону термодинамики только для обратимых процессов (в необратимых процессах частично или полностью разрушается)
Ограничена вторым законом термодинамики для всех процессов (включая обратимые)	Второй закон термодинамики не ограничивает ее для обратимых процессов
Является движением или способностью производить движение	Является работой или способностью совершать работу



Окончание табл. 2

Энергия	Эксергия
Всегда сохраняется в процессе, т. е. не может быть разрушена или образована	Не может быть разрушена или образована в обратимых процессах, но всегда разрушается (потребляется) в необратимых процессах
Является мерой количества	Является мерой количества и качества (в силу энтропии)

В предлагаемой методике эксергетического анализа жизненных циклов энергетических объектов в качестве критерия энергоэффективности объектов принимается коэффициент энергоэффективности  $K_{\text{эф}}$ , который представляет собой соотношение выработанной электроэнергии  $\mathcal{E}_{\text{экспл}}$  к затраченной эксергии в течение жизненного цикла объекта  $E_{\text{жц}}$ :

$$K_{\text{эф}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{экспл}}}{E_{\text{жц}}}.$$

В том случае, когда выработанная электроэнергия превосходит затраты эксергии в течение жизненного цикла, т. е.  $K_{\text{эф}} > 1$ , объект считается энергоэффективным, а если  $K_{\text{эф}} \leq 1$  — объект считается неэнергоэффективным. Таким образом, задача сводится к определению затрат эксергии и выработанной электроэнергии в течение жизненного цикла объекта.

Эта задача решается путем разбиения жизненного цикла объекта на три основных этапа — строительство, эксплуатацию и снятие с эксплуатации (рис. 1) — с последующим определением затрат эксергии на каждом из этапов и выработанной электроэнергии на этапе эксплуатации.

Продолжительность этапов, затраты эксергии на каждом из них и количество выработанной электроэнергии будут зависеть от типа энергетического объекта.

В общем случае для того, чтобы найти затраты эксергии на каждом из этапов, необходимо составлять подробный проект, в котором должны быть учтены затраты эксергии на все

виды выполненных и выполняемых работ, а также работы, которые будут выполнены. На этапе строительства затраты эксергии будут приходить на проектирование и строительство зданий и сооружений, производство и доставку строительных материалов, изготовление и монтаж оборудования и т. д. На этапе эксплуатации эксергию необходимо затратить на добычу и доставку топлива и эксплуатацию объекта. На этапе снятия с эксплуатации эксергия тратится на демонтаж зданий и сооружений, утилизацию оборудования и т. д.

На каждом из этапов осуществляются различные производственные процессы, т. е. согласно законам термодинамики совершается работа

$$A_{\text{max}} = -\Delta(U + p_0V - T_0S).$$

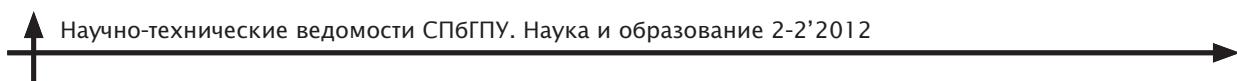
В результате происходящих на каждом этапе множества термодинамических процессов значение величины  $-\Delta(U + p_0V - T_0S)$  будет возрастать или убывать (в зависимости от параметров окружающей среды) до тех пор, пока не наступит полное равновесие с окружающей средой.

При таком подходе определение затраченной эксергии в течение жизненного цикла представляет собой сложную задачу, так как необходимо определить все составляющие затрат эксергии и найти их численные значения на каждом из этапов.

Для упрощения этой задачи в предлагаемой методике принимается, что каждый из этапов жизненного цикла представляет собой «черный



Рис. 1. Схема жизненного цикла энергетического объекта



«ящик»: учитываются только затраты эксергии на входе и выработанная электроэнергия на выходе рассматриваемого этапа, без детализации процессов, происходящих на этом этапе. Следует отметить, что изначально подход «черного ящика» был предложен для эксергетического анализа производственных процессов и энергетических установок.

Представление этапов жизненного цикла в виде «черных ящиков» исключает детальный анализ и определение вкладов каждого из всей совокупности процессов, происходящих на этапе.

Затраты эксергии на входе будут иметь место для всех трех этапов жизненного цикла объекта. Электроэнергия на выходе (выработанная электроэнергия)  $\dot{E}_{\text{экспл}}$  будет положительна только на этапе эксплуатации, а на этапах строительства и снятия с эксплуатации она равна нулю. Рассматривая затраты эксергии на входе каждого из этапов без детализации, можно принять, что затраты эксергии на входе на первом этапе будут приходиться на строительство  $E_{\text{стр}}$ , на втором — на эксплуатацию  $E_{\text{экспл}}$ , на третьем — на снятие объекта с эксплуатации  $E_{\text{снэ}}$  (рис. 2).

Одним из следствий такого определения понятия эксергия является рассмотрение ее как максимальной работы, которая была совершена, совершается и будет совершаться. При рассмотрении энергетических объектов эта работа, может быть определена как совокупность затрат материальных и трудовых ресурсов, т. е. эксергии на каждом из этапов жизненного цикла.

Тогда при рассмотрении этапов жизненного цикла в виде «черных ящиков» на этапе строительства в качестве затрат материальных и трудовых ресурсов можно принять капитальные вложения на строительство; на этапе эксплуатации — эксплуатационные расходы; на этапе сня-

тия с эксплуатации — капитальные затраты на снятие с эксплуатации.

В мировой и отечественной практике накоплен значительный опыт строительства и эксплуатации различных энергетических объектов. Имеются подробные статистические данные, которые принимаются в качестве значений основных исходных показателей для определения затрат эксергии и выработанной электроэнергии в течение жизненного цикла.

Ниже приведены основные показатели, необходимые для проведения анализа:  $K$  — капитальные вложения на строительство;  $K_{\text{снэ}}$  — капитальные затраты на снятие с эксплуатации;  $h$  — число часов использования установленной мощности;  $\Pi_t$  — стоимость топлива;  $t$  — срок эксплуатации.

В данном анализе значения основных показателей принимаются на основе данных Международного энергетического агентства, Европейской технической ассоциации по производству тепла и электроэнергии, Европейской ассоциации ветроэнергетики и др. с учетом данных исследований компании «Бритиш Петролеум», международного обзора мировой энергетики World Energy Outlook 2011, а также данных, имеющихся в доступной справочной и учебной литературе.

Определение затрат эксергии и выработанной электроэнергии производится на 1 кВт установленной мощности объекта с использованием удельных значений основных показателей.

Затраты эксергии и выработанная электроэнергия измеряются в энергетических единицах — кВт·ч. В рамках диссертационной работы был произведен анализ возможных показателей для перевода получаемых значений величин в энергетические единицы — кВт·ч. Он показал,

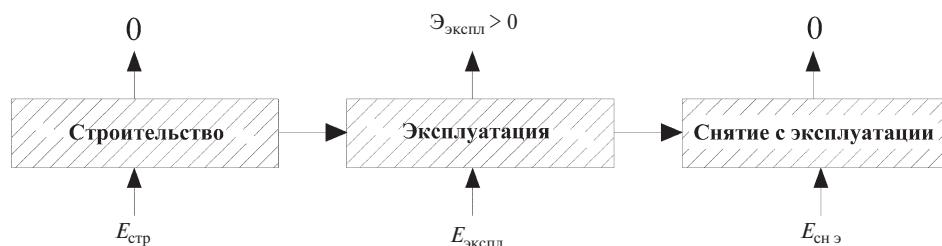


Рис. 2. Затраты эксергии и выработанная электроэнергия на этапах жизненного цикла объекта



что для перехода к энергетическим единицам (кВт·ч) наиболее оптимальными показателями являются себестоимость электроэнергии  $S$  и тариф на электроэнергию  $T$ .

При рассмотрении аналогичных источников энергии для перехода к энергетическим единицам (кВт·ч) используется показатель себестоимости  $S$ , так как он прямо пропорционален капитальным вложениям и наиболее полно отражает затраты эксергии. При рассмотрении принципиально различных источников электроэнергии для перехода к энергетическим единицам (кВт·ч) используется показатель тарифа на электроэнергию  $T$ , так как в этом случае все рассматриваемые источники находятся в «равных условиях». Правильность выбора данных показателей подтверждается следующими результатами расчетов, проведенных на этапе разработки методики:

Наименование источника энергии	$K_{\text{эф}}$
Атомная электростанция	1,4
Тепловая электростанция	1,6
Ветровая электростанция	1,3
Солнечная электростанция	0,6
Малая гидроэлектростанция	1,45
Наименование электростанции	$K_{\text{эф}}$
Тепловая электростанция	
на угле	1,5
на мазуте	1,4
Ветровая электростанция	
наземная	1,15
морская	0,8
Солнечная электростанция	
СФЭС	0,5
гелиоцентрическая	0,35

Полученные результаты не противоречат результатам, получаемым с помощью традиционных экономических методов оценки эффективности объектов: наибольший коэффициент энергоэффективности  $K_{\text{эф}} = 1,8$  имеет ТЭС, а наименьший СЭС  $K_{\text{эф}} = 0,6$ ; наземная ВЭС более энергоэффективна, чем морская ВЭС и т. д.

Состав и последовательность выполняемых работ на этапе строительства будут зависеть от типа рассматриваемого объекта.

В общем виде этап строительства включает в себя: выбор местоположения объекта и его мощности; инженерно-геологические изыскания площадки предполагаемого строительства; проектирование и строительство необходимой

инфраструктуры; проектирование и строительство зданий и сооружений; проектирование, изготовление и монтаж оборудования и т. д.

Для определения затрат эксергии на этапе строительства необходимо знать значения удельных капитальных вложений на строительство  $K_{\text{уд}}$ , себестоимость электроэнергии  $S$  или тариф на электроэнергию  $T$ .

Капитальные вложения представляют собой совокупность затрат материальных и трудовых ресурсов на строительство объекта, выраженные в энергоэкономических единицах. Перевод значений капитальных вложений в энергетические единицы, как уже говорилось выше, предполагается осуществлять с помощью показателей себестоимости электроэнергии  $S$  или тарифа на электроэнергию  $T$ .

Тогда затраты эксергии, кВт·ч, на этапе строительства можно найти, используя соотношение

$$E_{\text{стр}} = \frac{N_y K_{\text{уд}}}{S(T)},$$

где  $N_y$  — установленная мощность, принимаемая в расчетах равной 1 кВт;  $K_{\text{уд}}$  — удельные капитальные вложения на строительство, \$/кВт;  $S$  — себестоимость электроэнергии, \$/кВт;  $T$  — тариф на электроэнергию, \$/кВт;

Выработанная электроэнергия, кВт·ч, на этапе эксплуатации равна

$$\mathcal{E}_{\text{экспл}} = N_y h t,$$

где  $h$  — число часов использования установленной мощности, ч;  $t$  — срок эксплуатации, лет.

Затраты материальных и трудовых ресурсов, т. е. эксергии, на этапе эксплуатации будут приходить на эксплуатационные расходы (издержки). По значению эксплуатационных расходов и значениям показателей себестоимости  $S$  или тарифа  $T$  на электроэнергию можно определить затраты эксергии на этапе эксплуатации, выраженные в кВт·ч.

Состав и значения величин эксплуатационных расходов, \$, зависят от типа рассматриваемого объекта и в общем случае включают в себя [2]  $I_{\text{ам}}$  — годовые амортизационные отчисления от стоимости основных производственных фондов;  $I_{\text{топл}}$  — годовые издержки на оплату топлива;  $I_{\text{зп}}$  — годовые издержки на заработную плату;  $I_{\text{тр}}$  — годовые затраты на текущий ремонт основных фондов;  $I_{\text{пр}}$  — прочие расходы:



$$I_{\text{общ}} = I_{\text{ам}} + I_{\text{топл}} + I_{\text{зп}} + I_{\text{тр}} + I_{\text{пр}}.$$

Тогда затраты эксергии, кВт·ч, на этапе эксплуатации будут равны

$$E_{\text{экспл}} = E_{\text{ам}} + E_{\text{топл}} + E_{\text{зп}} + E_{\text{тр}} + E_{\text{пр}},$$

где  $E_{\text{ам}}$  — затраты эксергии на амортизацию;  $E_{\text{топл}}$  — затраты эксергии на топливо;  $E_{\text{зп}}$  — затраты эксергии на заработную плату;  $E_{\text{тр}}$  — затраты эксергии на текущий ремонт;  $E_{\text{пр}}$  — затраты эксергии на прочие расходы.

Составляющие затрат эксергии  $E$ , кВт·ч, на эксплуатационные расходы можно найти, используя соотношение

$$E = \frac{I}{S(T)},$$

где  $I$  — вид эксплуатационных расходов.

При определении затрат эксергии на амортизацию в качестве эксплуатационных расходов принимаются амортизационные отчисления  $I_{\text{ам}}$ , определяемые по формуле [2]

$$I_{\text{ам}} = \alpha_{\text{ам}} K_{\text{уд}} t,$$

где  $\alpha_{\text{ам}}$  — среднее значение коэффициента амортизационных отчислений, %, принимаемое в зависимости от типа объекта;  $K_{\text{уд}}$  — значение удельных капитальных вложений на строительство, \$/кВт.

При определении затрат эксергии на топливо принимается значение эксплуатационных расходов на топливо  $I_{\text{топл}}$ , которые зависят от типа рассматриваемого источника энергии.

Для атомной электростанции (АЭС) эксплуатационные расходы на топливо, \$, равны [2]

$$I_{\text{топл}} = G_{\text{т}} \Pi_{\text{т}},$$

$\Pi_{\text{т}}$  — стоимость топлива, \$/кг;  $G_{\text{т}}$  — масса топлива, кг, необходимая для работы АЭС и определяемая по формуле [2]

$$G_{\text{т}} = \frac{N_{\text{т}} h}{24 \bar{B}} t,$$

где  $h$  — число часов использования установленной мощности, ч;  $\bar{B}$  — глубина выгорания ядерного топлива, мВт·сут/кг;  $t$  — срок эксплуатации, лет;  $N_{\text{т}}$  — тепловая мощность реактора, кВт, определяемая по формуле

$$N_{\text{т}} = \frac{N_y}{\eta},$$

$\eta$  — коэффициент полезного действия АЭС.

Для тепловой электростанции (ТЭС) эксплуатационные расходы на топливо, \$, определяются по зависимости

$$I_{\text{топл}} = B_{\text{т}} \left( 1 + \frac{\alpha_{\text{п}}}{100} \right) \Pi_{\text{т}},$$

где  $\Pi_{\text{т}}$  — стоимость топлива;  $\alpha_{\text{п}}$  — потери топлива при транспортировке (для твердого топлива  $\alpha_{\text{п}} = 0,5\%$ , для всех остальных  $\alpha_{\text{п}} = 0$ );  $B_{\text{т}}$  — масса топлива, кг, необходимая для работы ТЭС в течение срока эксплуатации,  $B_{\text{т}} = \mathcal{E}_{\text{экспл}} m$ ;  $\mathcal{E}_{\text{экспл}}$  — выработанная электроэнергия, кВт·ч;  $m$  — масса топлива, кг, необходимая для выработки кВт·ч электроэнергии.

Эксплуатационные расходы на заработную плату  $I_{\text{зп}}$ , текущий ремонт  $I_{\text{тр}}$  и прочие издержки  $I_{\text{пр}}$  определяются в долях от амортизационных отчислений:

$$I_{\text{зп}} = 0,2 I_{\text{ам}}; I_{\text{тр}} = 0,2 I_{\text{ам}};$$

$$I_{\text{пр}} = (0,2 - 0,3) (I_{\text{ам}} + I_{\text{тр}} + I_{\text{зп}}).$$

Этап снятия с эксплуатации в общем виде включает в себя: демонтаж зданий и сооружений, демонтаж и утилизацию оборудования, рекультивацию территории, хранение и переработку отработавшего ядерного топлива (для АЭС) и т. д.

Для определения затрат эксергии на этапе снятия с эксплуатации необходимо знать значения удельных капитальных затрат на снятие с эксплуатации  $K_{\text{сн}} \text{уд}$ , \$/кВт, себестоимости электроэнергии  $S$  или тарифа на электроэнергию  $T$ .

Тогда затраты эксергии на этапе снятия объекта с эксплуатации, кВт·ч, можно найти, используя соотношение

$$E_{\text{сн}} = \frac{N_y K_{\text{сн}} \text{уд}}{S(T)}.$$

После определения затрат эксергии в течение жизненного цикла и выработанной электроэнергии на этапе эксплуатации находится значение коэффициента энергоэффективности  $K_{\text{эф}}$ :

$$K_{\text{эф}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{экспл}}}{E_{\text{ж ц}}},$$

где  $\mathcal{E}_{\text{экспл}}$  — выработанная электроэнергия, кВт·ч;  $E_{\text{ж ц}}$  — затраты эксергии в течение жизненного цикла, кВт·ч, определяемые по формуле

$$E_{\text{ж ц}} + E_{\text{стр}} + E_{\text{экспл}} + E_{\text{сн э}};$$

$E_{\text{стр}}$  — затраты эксергии на этапе строительства;  $E_{\text{экспл}}$  — затраты эксергии на этапе эксплуатации;  $E_{\text{сн э}}$  — затраты эксергии на этапе снятия с эксплуатации.

В зависимости от полученного значения  $K_{\text{эф}}$  делаются выводы об энергоэффективности объекта:

$K_{\text{эф}} > 1$  — проектируемый объект считается энергоэффективным;

$K_{\text{эф}} \leq 1$  — проектируемый объект считается неэнергоэффективным.

Главное достоинство предлагаемой методики заключается в том, что с ее помощью можно быстро произвести оценку, сопоставление и анализ энергоэффективности различных источников энергии.

Полезность применения данной методики можно назвать «запретительной». Если результаты анализа показывают низкий коэффициент энергоэффективности объекта ( $K_{\text{эф}} < 1$ ) нет необходимости производить более детальный экономический расчет. Если коэффициент энергоэффективности  $K_{\text{эф}} \geq 1$ , объект заслуживает проведения более детального экономического анализа.

Таким образом, с помощью предлагаемой методики можно производить предварительную «отбраковку» проектов электростанций и оставлять для более подробных экономических расчетов только энергетически приемлемые.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федоров, М.П.** Энергетические технологии и мировое экономическое развитие: прошлое, настоящее, будущее [Текст] / М.П. Федоров, В.Р. Окороков, Р.В. Окороков. — СПб.: Наука, 2010. — 412 с.

2. **Синёв, Н.М.** Экономика ядерной энергетики: Основы технологии и экономики производства ядерного топлива. Экономика АЭС [Текст]: учеб. пособие для вузов / Н.М. Синёв. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 480 с.: ил.

3. **Янтовский, Е.И.** Потоки энергии и эксергии [Текст] / Е.И. Янтовский. — М.: Наука, 1988. — 144 с.

4. **Романов, М.В.** Термодинамический подход для обеспечения устойчивого развития природно-хозяй-

ственных систем [Текст] / М.В. Романов. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2003. — 119 с.

5. **Dincer, I.** Exergy: energy, environment and sustainable development [Текст] / I. Dincer, M.A. Rosen. — Elsevier, 2007. — 459 p.

6. **Wall, G.** On exergy and sustainable development—Part 2: Indicators and methods [Текст] / G. Wall., M. Gong // Exergy Int. J. 2001. № 1(4). — P. 217–233.

7. **Wall, G.** Life Cycle Analysis of Renewable Energy Systems [Текст] / G. Wall // The Open Renewable Energy Journal. — 2011. № 4. — P. 72–77.

8. **World Energy Outlook 2011** [Текст]: Международный обзор мировой энергетики за 2011 год.



# МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.01:539.3

А.А. Грачев, С.А. Соколов

## ВЛИЯНИЕ НЕПЛОСКОСТНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ТОНКОСТЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН

Большинство металлических конструкций грузоподъемных машин — балки, рамы или различные пространственные структуры — сварные тонкостенные листовые конструкции. Эти конструкции образуются из листовых элементов, т. е. пластин, загруженных по кромкам нормальными и касательными напряжениями. Отношение габаритных размеров этих пластин к толщине составляет  $t/d = 60-200$ , что позволяет считать такие конструкции тонкостенными. В существующих инженерных методиках расчета листовых конструкций, как аналитических, так и численных, принято считать, что эти пластины — плоские. Однако в реальных конструкциях, изготовленных с применением сварки, в результате тепловых деформаций сварных швов, неточности сборки стыковых соединений и исходной неплоскостиности проката пластины оказываются неплоскими. Это приводит к тому, что при продольном нагружении в пластинах возникают поперечные деформации изгиба, меняются продольная жесткость и распределение напряжений по сечению. В нормативных материалах установлены допустимые значения относительной стрелки прогиба пластин, которые составляют  $[z_0/d] = 0,005$  или же  $[z_0/t] = 5$ . Однако данное условие в основном возникло из конструктивно-технологических соображений и для обеспечения товарного вида изделия.

Оценивая влияние неплоскостиности пластин с позиции обеспечения работоспособности и долговечности конструкции, следует учитывать, что снижение продольной жесткости элемента конструкции приводит к перераспределению напряжений по сечению. При этом

снижаются напряжения в искривленных частях пластины, расположенных вдали от закреплений, и повышаются напряжения в зонах, имеющих большую продольную жесткость. В коробчатых балках, которые служат основным несущим элементом большинства грузоподъемных машин, такими местами являются углы, где стенки соединяются с поясами. В этих же зонах возникают наибольшие нормальные напряжения от сложного изгиба и располагаются сварочные концентраты от присоединения диафрагм, кронштейнов и пр.

Цель данной работы — разработка методики оценки влияния неплоскостиности элементов тонкостенных конструкций на их напряженно-деформированное состояние, а также рекомендаций по учету этого фактора в инженерных расчетах и нормативных материалах.

В качестве модели элемента тонкостенной конструкции принята прямоугольная пластина, кромки которой лежат в одной плоскости (базовая плоскость), а срединная поверхность — пологая с максимальным отклонением от базовой плоскости  $z_0$  (рис.1). Пластина шарнирно оперта по контуру и загружена нормальными напряжениями по двум противоположным кромкам. Распределение номинальных напряжений, т. е. вычисленных с применением гипотезы плоских сечений, зададим как

$$\sigma(y) = \sigma_{\max} (1 - \gamma y/d), \quad (1)$$

где  $\sigma_{\max}$  — наибольшее сжимающее напряжение на кромке  $y = 0$  (рис.1),  $\gamma = 1 - \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$  — параметр нагружения;  $\sigma_{\min}$  — напряжение на кромке  $y = d$  (растягивающие напряжения счи-



таются отрицательными);  $d$  — ширина пластины. Далее рассмотрим процесс деформирования искривленной пластины, считая, что нагруженные сечения остаются плоскими.

Для оценки влияния искривления пластины на ее погонную жесткость представим ее в виде совокупности единичных полосок, шарнирно закрепленных по концам и загруженных продольной погонной нагрузкой  $q(y) = t\sigma(y)$ . Отношение продольной податливости искривленного стержня к продольной податливости прямого стержня вычисляется по формуле [1]

$$\begin{aligned}\chi &= 1 + \frac{(2+\varphi)}{4(1-\varphi)^2} \frac{z_0(y)^2}{\rho^2} = \\ &= 1 + \frac{3(2+\varphi)}{(1-\varphi)^2} \left( \frac{z_0(y)}{t} \right)^2, \quad (2)\end{aligned}$$

где  $\rho \approx t/3,5$  — радиус инерции сечения единичной полоски;  $\varphi = \sigma_{\max}/\sigma_c$  — отношение действующих напряжений к критическим;  $z_0(y)$  — стрелка прогиба единичной полоски, расположенной на расстоянии  $y$  от кромки. Форма искривления пластины может быть различна и в реальных конструкциях в основном зависит от технологии сварки. Численный анализ показал, что наибольшее снижение продольной жесткости пластины происходит в том случае, когда форма искривления соответствует первой форме потери устойчивости.

Значение критических напряжений для данной модели при  $0 \leq \gamma \leq 2$  и  $\alpha = a/d \geq 0,4$  вычислим как [1]

$$\sigma_c = k_s \sigma_{c0} = k_s K_{s0} \left( \frac{t}{d} \right)^2 \leq \sigma_T, \text{ МПа}, \quad (3)$$

где

$$K_{s0} = \frac{\pi^2 E}{3(1-\mu^2)};$$

$$k_s = \left\{ \left[ 1 + (0,59 + \alpha)^{-7,8} \right] (1 + 0,42\gamma) + 0,52\gamma^3 \right\} \zeta_s;$$

$\zeta_s \geq 1$  — коэффициент защемления, учитывающий условия закрепления пластины по кромкам, для шарнирно опертой пластины  $\zeta_s = 1$ .

Таким образом, подставляя (3) в формулу (2) и введя некоторые поправки, учитывающие

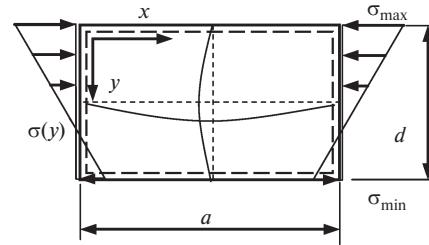


Рис. 1. Модель неплоской пластины

переменную загруженность пластины по высоте, получим распределение параметра изменения коэффициентов продольной податливости единичных полосок  $\chi(y)$  по высоте пластины:

$$\chi(y) = 1 + \frac{3(2+\bar{\varphi})}{(1-\bar{\varphi})^2} \left( \frac{z_0(y)}{t} \right)^2 \Lambda(y). \quad (4)$$

В выражении (4)  $\bar{\varphi}$  вычисляется, как указано выше, но для полосок, расположенных в области сжатия, этой величине присваивается знак «плюс», а в зоне растяжения — «минус». Коэффициент

$$\Lambda(y) = 0,15(1,05 - \bar{\varphi})^2 \frac{t}{z_0}$$

введен по результатам сравнения расчетных значений коэффициентов погонной податливости пластины, полученных аналитически и методом конечных элементов, для учета взаимосвязи полосок в пластине.

Для описания переменной погонной податливости неплоской пластины можно использо-

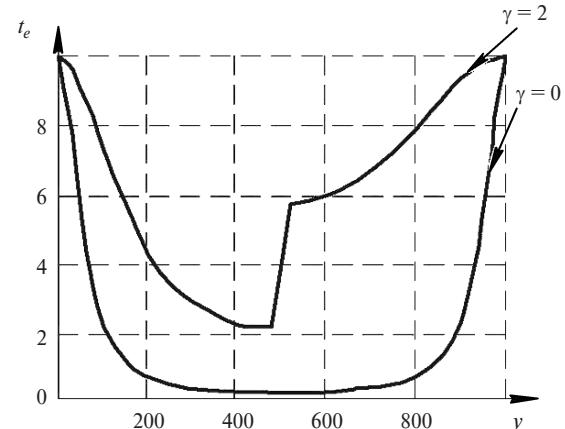


Рис. 2. Распределение эквивалентных толщин

$t_e(y) = t/\chi(y)$  по высоте балки  
при  $t = 10$  мм и  $z_0 = 20$  мм



вать модель плоской пластины эквивалентной толщины, значение которой вычисляется из условия равенства коэффициентов податливости. При этом эквивалентная толщина вычисляется как  $t_e(y) = t/\chi(y)$ . Характер распределения эквивалентных толщин по высоте пластины, загруженной равномерным сжатием и изгибом, показан на рис. 2. Как видно, эквивалентная толщина переменна по высоте пластины, так как зависит от формы ее прогиба и значения действующих напряжений. В области растяжения при нагружении изгибом толщина существенно увеличивается.

Изменение податливости пластины в целом характеризуется отношениями перемещения  $\Delta_{xc}$  и угла поворота  $\Theta_c$  нагруженной кромки искривленной пластины к перемещению  $\Delta_{x0}$  и углу поворота  $\Theta_0$  кромки плоской пластины:  $\delta = \Delta_{xc}/\Delta_{x0}$  и  $\psi = \Theta_c/\Theta_0$ . Примеры расчета показывают, что коэффициент податливости сжатой искривленной пластины при  $z_0/t = 0,1-2,0$  повышается в 1,5-2,0 раза. Сопоставление результатов аналитических расчетов по выражению (4) с численными расчетами показывает, что погрешность оценок  $\eta_\delta = \frac{\chi(y)}{\chi_{FEM}}$  в основном лежит в интервале  $\pm 12\%$  (рис. 3) и только при  $z_0/t > 1$  она вырастает до  $\pm 18\%$ .

Используя представленные зависимости, можно получить оценки изменения жесткости и распределения напряжений по сечению коробчатой балки, стенки и пояса, которые имеют

некоторую неплоскость. Для этого заменим указанные элементы плоскими пластинами эквивалентной толщины, переменной по ширине пластины. Для эквивалентного сечения следует вычислить координаты положения нейтральной оси, эквивалентную площадь и моменты инерции. Распределение нормальных напряжений в таком сечении от действия продольных сил и изгибающих моментов будет подчиняться гипотезе плоских сечений. Напряжения, действующие в балке, состоящей из неплоских листов, вычисляются так:

$$\sigma_k(y) = \sigma_e(y) \frac{t_e}{t}.$$

Следовательно, равенство  $\sigma_k(y) = \sigma_e(y)$  будет иметь место только в тех местах, где  $t_e = t$ , т. е. там, где пластины балки не имели искривления. В общем случае это соответствует угловым зонам, узлам соединения поясов со стенками — там получаются повышенные напряжения.

Для проверки полученного решения произведен анализ напряженно-деформированного состояния коробчатых балок. Первая модель М1 имела соотношение габаритных размеров сечения  $b/h = 0,35$  и толщину поясных листов  $t_f = 2t_w$  ( $t_w$  — толщина стенок). Эти соотношения характерны для пролетных балок кранов мостового типа. Вторая модель М2 имела размеры сечения  $b/h = 1,0$  и  $t_f = t_w$ . Такие размеры характерны для стрел порталных кранов, которые подвергаются значительному продоль-

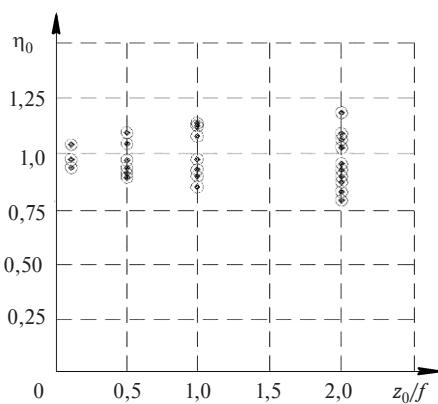


Рис. 3. Зависимость отношения коэффициентов податливости пластины, вычисленных аналитически и с помощью МКЭ, от относительной стрелки прогиба поясов и стенок

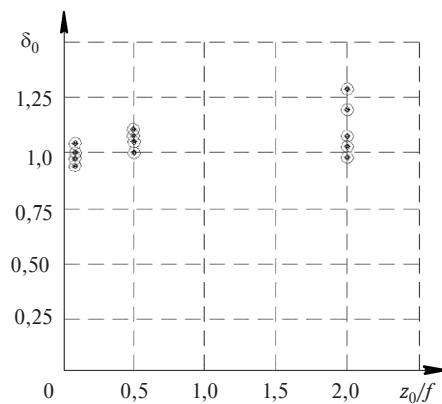


Рис. 4. Зависимость отношения коэффициентов податливости балок М1 и М2, вычисленных аналитически и с помощью МКЭ, от относительной стрелки прогиба поясов

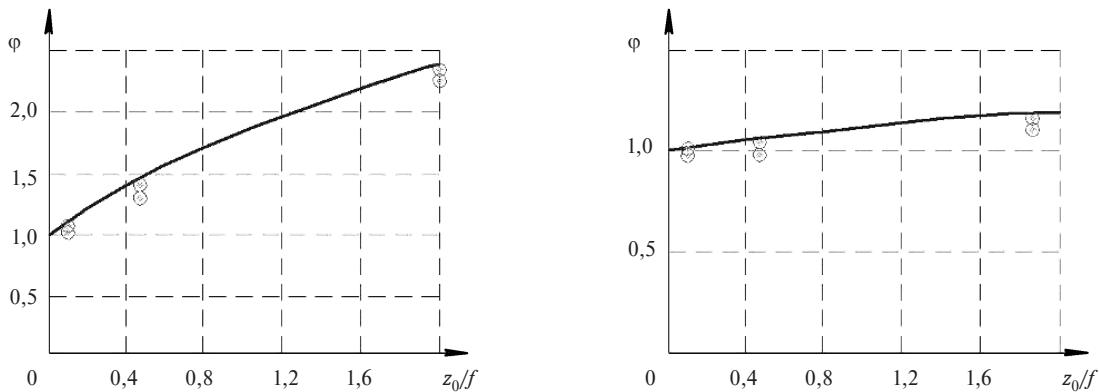


Рис. 5. Графики зависимости отношений максимальных напряжений при сжатии балки типа М2 (а) и изгиба балки типа М1 (б) с неплоскими элементами к напряжениям в той же балке с плоскими элементами (линией показана аналитическая зависимость, точками — результаты численного моделирования)

ному сжатию и изгибу в двух плоскостях. Сравнение изменения коэффициента податливости, возникающего от искривления пластин, при расчете по аналитической методике ( $\lambda_{\text{analit}}$ ) и по МКЭ ( $\lambda_{\text{FEM}}$ ) представлено на рис. 4  $\left( \delta_{\lambda} = \frac{\lambda_{\text{analit}}}{\lambda_{\text{FEM}}} \right)$ . На рис. 5 показаны значения от-

ношений максимальных напряжений в угловых узлах балки типа М2 с неплоскими стенками и поясами при сжатии к напряжениям в той же балке с плоскими элементами ( $\phi = \sigma_k(0)/\sigma_{\text{max}}$ ). Как видно из приведенных графиков, повышение напряжений в углах может достигать двукратного значения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов, С.А. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин [Текст] / С.А. Соколов.— СПб.: Политехника, 2005.— 423 с.
2. Грачев, А.А. Устойчивость пластин с ребрами [Текст] / А.А. Грачев, С.А. Соколов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2010.— № 4(110).
3. РД 10-112-6-03. Методические указания по обследованию специальных металлургических кранов [Текст].— М., 2003.

УДК 621.923

Ю.В. Макар

## РАСЧЕТ ЧИСЛА РАБОТАЮЩИХ ЗЕРЕН НА ПЛОЩАДКЕ КОНТАКТА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗАГОТОВОК

Главным движением шлифования является вращение режущего инструмента с очень большой окружной скоростью. Чаще всего в качестве шлифовального инструмента используются шлифовальные круги (ШК). Абразивные зерна расположены в круге закономерно и удер-

живаются связующим материалом. Каждое абразивное зерно работает как зуб фрезы, снимая стружку.

Процесс резания каждым зерном осуществляется за микросекунды. Обработанная поверхность представляет собой совокупность



микроследов абразивных зерен и имеет малую шероховатость. Часть зерен ориентирована в ШК так, что не может резать обрабатываемую поверхность. Такие зерна производят работу трения по поверхности резания.

Абразивные инструменты из природных и синтетических алмазов опробованы на многих операциях при обработке разных деталей и режущих инструментах из труднообрабатываемых материалов. Изысканы те области, в которых абразивная обработка инструментами из сверхтвёрдых материалов достаточно эффективна и экономически целесообразна.

Одной из актуальнейших проблем применения алмазных кругов на станках с ЧПУ — поддержание их стабильной режущей способности и обеспечение качества обработанной поверхности. Математическое описание отдельных параметров процессов шлифования весьма важно для управления ими.

Для оценки эффективности процесса шлифования и работоспособности шлифовальных инструментов используются разные показатели:

линейный съем материала за единицу времени, мм/мин;

износ инструмента, мм;

период стойкости инструмента, мин;

шероховатость обработанной поверхности  $R_a$ , мкм.

В работе предложена методика определения числа работающих зерен на площадке контакта круга с заготовкой. Произведен расчет для случаев круглого наружного и внутреннего шлифования деталей из материала КНТ16 кругами 1A1 AC40 160/125 М2-01 100 (алмазный шлифовальный круг прямого профиля формы 1A1 из алмазов марки AC40 зернистостью 160/125 на металлической связке М2-01 с 100 %-й концентрацией алмазного порошка) и А8 AC4 100/80 М2-01 100 (алмазный шлифовальный круг формы А8 из алмазов марки AC4 зернистостью 100/80 на металлической связке М2-01 с 100 %-й концентрацией алмазного порошка).

Число работающих зерен в круге при глубине резания  $t$  и площади контакта  $S_h$  определяется по формуле

$$N_t = N_{[\Delta n-1, \Delta n]} S_h,$$

где  $N_{[\Delta n-1, \Delta n]}$  — плотность зерен, шт/мм<sup>2</sup>, в слое  $(\Delta(n-1) - \Delta n)$ .

Методика расчета числа работающих зерен в круге при их погружении в материал на глубину  $t$  включает:

определение площади  $S_h$ , мм<sup>2</sup>, контакта круга с поверхностью заготовки при заданной глубине  $t$  резания за 1 ход;

вычисление для назначенного алмазного круга плотности  $N_{[\Delta n-1, \Delta n]}$  зерен при глубине  $t$ , мм, их погружения в материал заготовки;

вычисление числа работающих зерен в круге при глубине  $t$  и площади контакта  $S_h$ .

**Определение площади  $S_h$ , мм<sup>2</sup>, контакта круга с поверхностью заготовки при заданной глубине  $t$  резания за 1 ход**

На рис.1 показаны схемы шлифования наружной и внутренней цилиндрических поверхностей кругом 1A1, где  $R_u$  — радиус инструмента;  $r_z$  — радиус заготовки.

Зависимость площади  $S_h$  контакта кругов с цилиндрической заготовкой при наружном шлифовании (см. рис. 1, а) от глубины внедрения  $t$  рассчитывается по формулам

$$a_u(t) = t - \frac{R_u t - 0,5t^2}{r_z + R_u - t};$$

$$I(t) = 4\pi R_u \frac{\operatorname{arctg} \left[ \sqrt{\frac{1}{\left[ \frac{R_u - a_u(t)}{R_u} \right]^2} - 1} \right]}{360};$$

$$S_h = I(t) \frac{V_{os}}{n_{zag}}.$$

Для случая внутреннего шлифования (см. рис. 1, б) зависимости для расчета площади контакта  $S_h$  от глубины внедрения  $t$  будут иметь вид

$$a_u(t) = t + \frac{r_z - (R_u - t) - t^2}{2} -$$

$$-\sqrt{\frac{[r_z - (R_u - t) - t]^2}{4} - 2t[(R_u - t) + t]};$$

$$\operatorname{arctg} \left[ \sqrt{\frac{1}{\left[ \frac{R_u - t - a_u(t)}{R_u - t} \right]^2} - 1} \right]$$

$$I(t) = 4\pi(R_u - t) \frac{\operatorname{arctg} \left[ \sqrt{\frac{1}{\left[ \frac{R_u - t - a_u(t)}{R_u - t} \right]^2} - 1} \right]}{360};$$

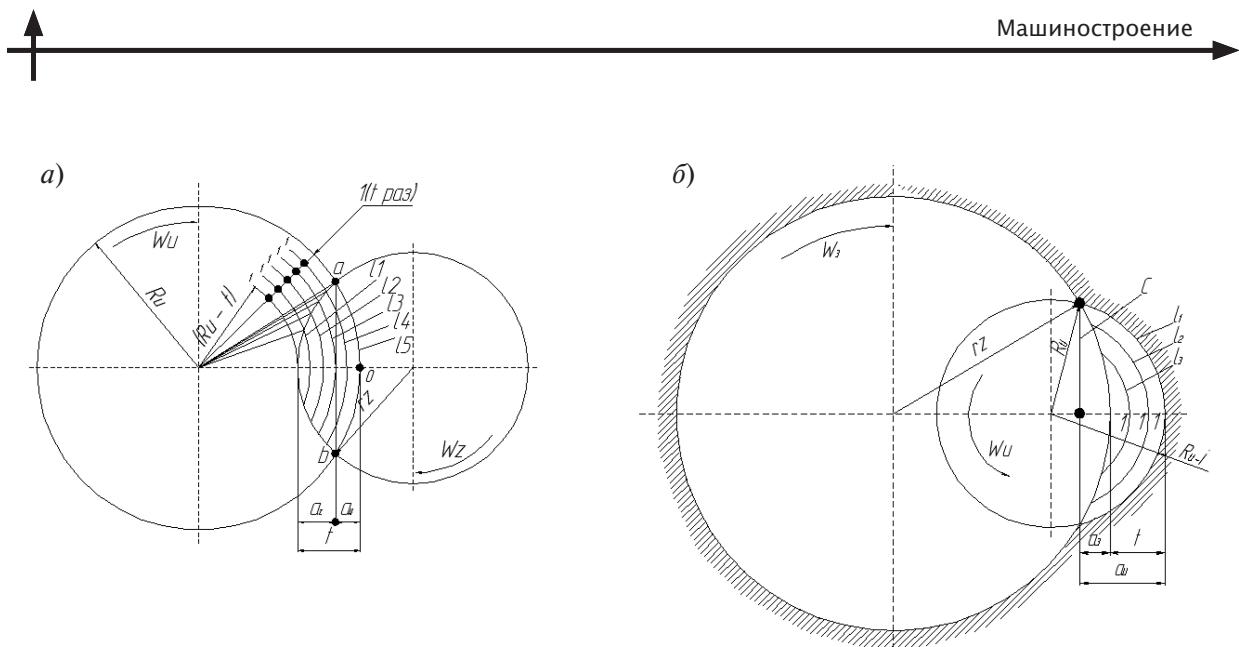


Рис. 1. Схемы шлифования для расчета площади контакта круга с заготовкой:  
а — наружное шлифование; б — внутреннее. Обозначения на схемах используются в формулах и объяснены в тексте статьи

$$S_h(t) = I(t) \frac{V_{os}}{n_{zag}},$$

где  $S_h$  — площадь контакта;  $V_{os}$  — осевая подача;  $n_{zag}$  — частота вращения заготовки.

#### Вычисление для назначенного алмазного круга плотности $N_{[\Delta n-1, \Delta n]}$ зерен при глубине $t$ , мм, их погружения в материал заготовки

Вершины алмазных зерен в шлифовальных кругах в направлении, нормальном к обрабатываемой поверхности, расположены по закону нормального распределения [3]. Для расчета количества работающих зерен на единице площади круга необходимо вводить понятие слоев (рис. 2), которые позволяют назначать и вычислять реальную глубину погружения зерен круга в шлифуемую поверхность материала заготовки.

Для вычисления числа работающих зерен  $N_t$ , шт/мм<sup>2</sup>, произведем следующие расчеты.

Количество зерен на единице площади круга, или плотность зерен, вершины которых находятся в слое  $t = \Delta_2 - \Delta_1$  абразивного рельефа, вычисляется по формуле

$$N_{[\Delta n-1, \Delta n]} = N_1 (1 - \varepsilon) \int_{\frac{\Delta n-1}{1-\varepsilon}}^{\frac{\Delta n}{1-\varepsilon}} [1 - F_L(x)] dx,$$

где  $N_1$  — среднее число зерен в 1 мм<sup>3</sup> алмазосодержащего пространства;  $\varepsilon = 0,5$ ;  $F_L(x)$  — функция распределения высот зерен в алмазосодержащем пространстве.

важащем пространстве, определяемая как сумма функций  $F_l(x)$  (функция распределения случайной величины  $l$ ) и  $F_1(x)$  (функция, учитывающая наклон величины  $l$  к оси  $y$ ),  $F_L(x) = F_l(x) + F_1(x)$ .

Функция распределения случайной величины  $l$  и функция, учитывающая наклон величины  $l$  к оси  $y$ , рассчитываются соответственно по формулам

$$F_l(x) = \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sigma_l \right) \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t-l}{\sigma_l} \right)^2} dt;$$

$$F_1(x) = K \left( \frac{1}{\sqrt{1-\alpha}} \right) \times$$

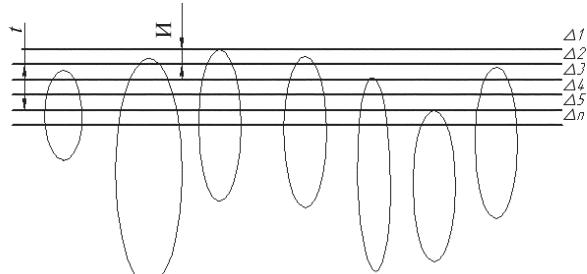


Рис. 2. Схема расположения зерен в алмазосодержащем пространстве круга:  
И — износ зерен круга;

$$\times \int_{\frac{x}{\alpha}}^{\frac{x}{\alpha}} \sqrt{\left(\frac{x}{t}\right)^2 - \alpha^2} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\bar{t}}{\sigma_l}\right)^2} dt,$$

где  $K = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\sigma_l$ ;  $\bar{t} = D2M\left(\frac{l}{D2}\right)$  — средняя длина зерна;  $D2$  — размер нижней фракции зерен в круге (например,  $D1/D2 = 100/80$ ,  $D2 = 80$ ).

#### Вычисление числа работающих зерен в круге при глубине $t$ и площади контакта $S_h$

Результаты расчетов числа работающих зерен по формуле  $N_t = N_{[\Delta n-1, \Delta n]} S_h$  сведены в таблицу.

В пакете Mathcad был произведен расчет модели и построены графики (рис. 3).

Из этих графиков видно, что с увеличением глубины внедрения происходит рост площадки контакта круга с заготовкой, плотность работающих зерен алмазосодержащего пространства кругов также увеличивается с ростом глубины внедрения и уменьшением зернистости кругов.

#### Расчетное число работающих зерен в различных слоях алмазного круга

Толщина слоя $\Delta 0-\Delta n$ , мкм	Число работающих зерен $N_t$	
	При наружном шлифовании	При внутреннем шлифовании
0–1	2,52	0,038
0–2	4,92	0,073
0–3	7,21	0,106
0–4	9,4	0,136
0–5	11,5	0,164
0–6	13,5	0,189
0–7	15,4	0,214
0–8	17,2	0,236
0–9	18,9	0,256
0–10	20,5	0,275

Кроме того, исследования показали, что на поверхности кругов находится наименьшее количество зерен, а по мере увеличения глубины внедрения их число растет. При этом приращение количества зерен уменьшается. С увеличением

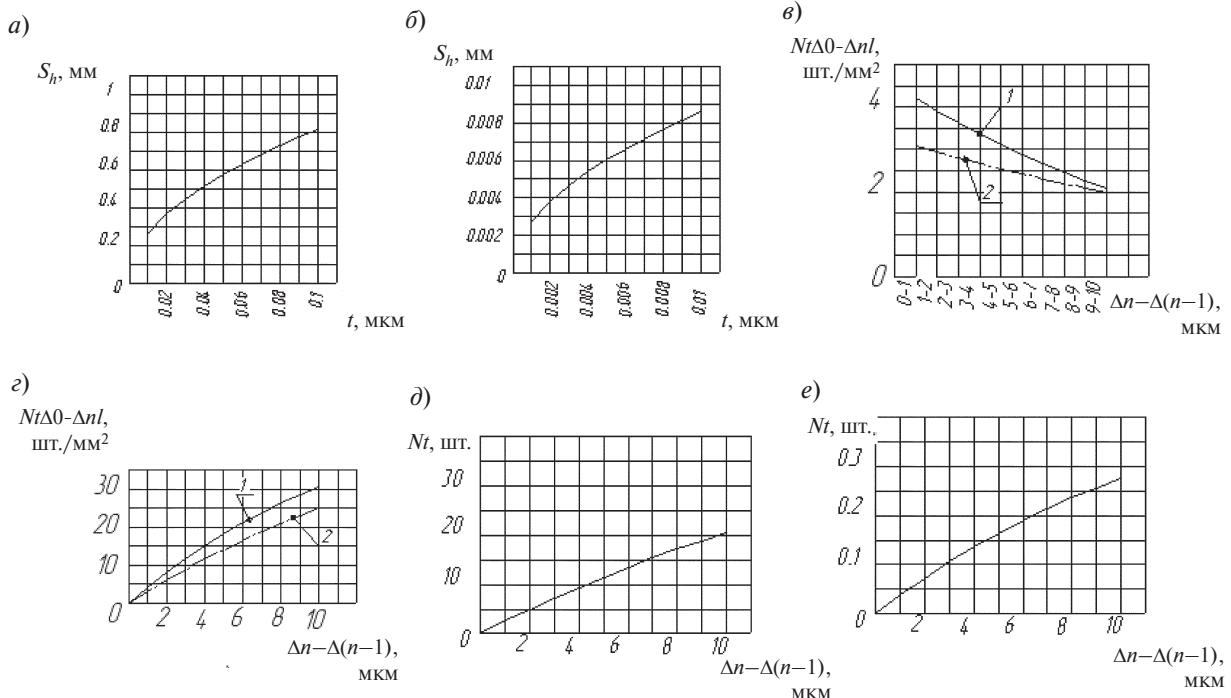


Рис. 3. Зависимости площади контакта  $S_h$  от глубины внедрения  $t$  для наружного (а) и внутреннего (б) шлифования, плотности зерен (с) и приращения плотности зерен по слоям (д) в алмазосодержащем пространстве круга (1 — круг А8 АС4 100/80 100, 2 — круг 1А1 АС40 160/125 М2–01 100), количества работающих зерен на площадке контакта круга с заготовкой для круга А8 АС4 100/80 100 (д) и круга 1А1 АС40 160/125 М2–01 100 (е)



глубины расположения одномикронного слоя алмазосодержащего пространства круга приращение числа вершин работающих зерен в слое уменьшается по сравнению с вышерасположенным слоем.

В работе получен показатель — число работающих зерен на площадке контакта круга с заготовкой, который определяет его режущую способность.

Получены математические зависимости для вычисления площади  $S_h$ ,  $\text{мм}^2$ , контакта кругов

с поверхностью заготовки, плотности зерен  $N_{\Delta n-1, \Delta n}$ ,  $\text{шт.}/\text{мм}^2$ , и количества  $N_t$ , шт., работающих зерен на площадке контакта.

Рассчитаны графики плотности зерен на глубине внедрения  $t$  и плотность зерен на глубине внедрения  $t + I$ , где  $I$  — износ зерен круга.

С увеличением износа  $I$  круга число работающих зерен на площадке контакта при той же глубине внедрения возрастает.

Получена формула для числа зерен на площадке контакта  $N_t$ , шт., которая используется при расчете режущей способности кругов [3].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Маслов, Е.Н.** Теория шлифования материалов [Текст] / Е.Н. Маслов.— М.: Машиностроение, 1974.— 317 с.
2. **Цыпкин, Р.З.** Алмазное шлифование неметаллических материалов [Текст]: Обзор / Р.З. Цыпкин / НИИМаш.— М., 1987.— 55 с.
3. **Никитков, Н.В.** Математическое моделирование процессов алмазной абразивной обработки хрупких керамических материалов [Текст] / Н.В. Никитков // Математическое моделирование в машиностроении. Труды СПбГТУ. № 466. Спб.: Изд-во СПбГТУ, 1997.— 32–36 с.

УДК 621.822.5.001.6

*Н.А. Пелевин, П.Ю. Пискарев, В.А. Прокопенко*

### ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ШПИНДЕЛЬНЫХ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ ТЯЖЕЛОГО РАСТОЧНОГО МОДУЛЯ

Совершенствование и повышение технических и эксплуатационных показателей шпиндельных узлов (ШУ) металлорежущих станков (МРС), в первую очередь их подшипников, — наиболее эффективный путь в направлении улучшения статических характеристик и динамического качества, демпфирования и вибrouстойчивости, долговечности и т. п. Наибольшие резервы при этом находятся в области перехода с традиционных опор качения на гидростатические подшипники (ГСП) [1–3]. Имеющийся опыт отечественного станкостроения, например разработка и эксплуатация тяжелого гибкого производственного модуля (ГПМ) модели ЛР520-ПМФ4, показал эффективность использования ГСП. Существенный интерес представляют результаты исследования возможностей различных систем управления ГСП, в том чис-

ле введение в них, помимо традиционно применяемых дросселей, таких элементов управления, как мембранные регуляторы, обладающие наилучшими эксплуатационно-техническими характеристиками по сравнению с другими типами регуляторов.

В статье применительно к условиям и характеристикам вышеуказанного станка излагаются основные результаты сравнительных исследований нескольких вариантов схемы управления опор ГСП в ШУ:

Вариант 1: в передней (ПО) и задней (ЗО) опорах ШУ используются два дросселя типа «сопло — заслонка» по каждой координатной оси (базовый вариант, использованный в упомянутом выше ГПМ модели ЛР520-ПМФ4 — см. рис. 1);

В радиальном четырехпорном ГСП равномерно по окружности выполнены несущие опоры

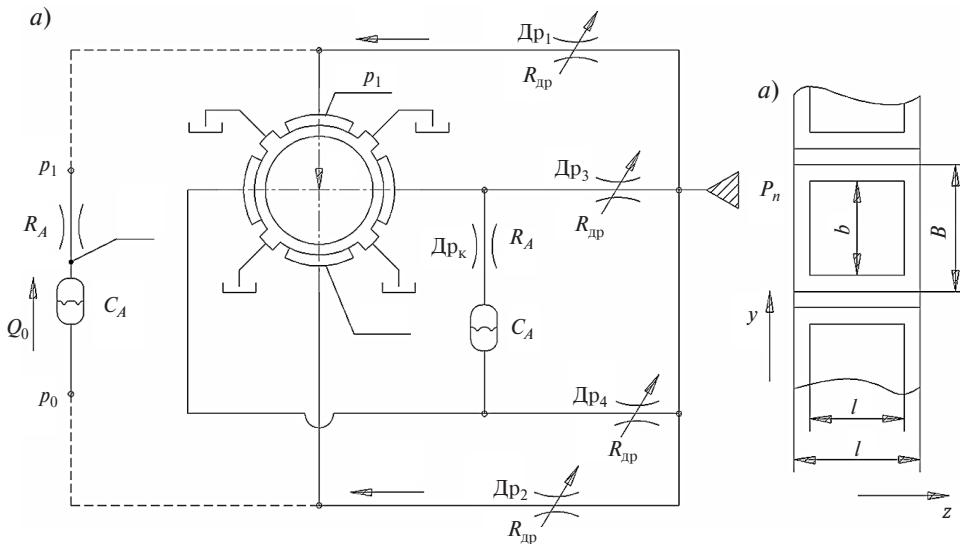


Рис. 1. Гидравлическая схема (а) дроссельного варианта ГСП и развертка опор ГСП на плоскость (б)

с разделительными. Подвод гидравлического масла осуществляется через дроссели (Др<sub>1</sub>, Др<sub>2</sub>, Др<sub>3</sub>, Др<sub>4</sub>), при этом вал занимает эксцентричное положение, зазоры в подшипнике перераспределяются, что приводит к увеличению давления ( $p_1$ ) масла в одних карманах и уменьшению в противоположных ( $p_0$ ). Уравнивания давления в карманах не происходит вследствие наличия дросселей на входе в каждый из них. Отвод — через торцы ГСП и упомянутые канавки. Для улучшения динамических свойств ГСП предусмотрены корректирующие средства в виде  $RC$ -цепи между противолежащими карманами ГСП (рис. 1, а — пунктирными линиями).  $C_A$  — емкость гидрокорректора,  $R_A$  — гидросопротивление дросселя.

Вариант 2: в ПО ШУ используются дроссель типа «сопло—заслонка» и мембранный регулятор, в ЗО — два аналогичных дросселя;

Вариант 3: в ПО и ЗО ШУ используются дроссель типа «сопло—заслонка» и схема управления «насос — карман»;

Вариант 4: в ПО и ЗО ШУ используется схема управления «насос — карман».

Все исследования выполнены при следующих исходных данных: диаметр выдвижного шпинделя — 160 мм; размеры опоры  $B \times L$  — 100×100 мм; размеры кармана  $b \times l$  — 88×88 мм; радиальный зазор  $h$  = 45 мкм; нагрузка в передней опоре  $R_{п_0}$  = 21 кН (усилие резания  $P_Z$  = 10 кН); динамическая вязкость рабочей жид-

кости  $\mu$  = 0,05 Па·с (ИГП-18 при 25 °C), рабочее давление  $p_{п}$  = 8,5 МПа.

Для комбинированных схем управления ГСП, какими являются дроссель «насос — карман» (вариант № 4) и дроссель регулятор (вариант № 2), статические характеристики рассмотрены для случаев приложения нагрузки различного направления действия. Это обусловлено тем, что ГСП с комбинированными схемами управления имеют разную по значению жесткость опор при изменении направлении действия нагрузки, т. е. являются несимметричными.

На рис. 2 приведены зависимости статической ошибки  $\Delta h = f(p_{п})$  при различных уровнях нагрузок. Из них следует, что, реализованная в станке ЛР520-ПМФ4 дроссельная схема управления (вариант № 1) обладает наиболее низкой несущей способностью (кривая 1). Схема управления «насос — карман» (вариант № 4) имеет наибольшую жесткость при больших нагрузках (кривая 4) и уступает схеме с регулятором при малых нагрузках. Схема управления типа дроссель «насос — карман» (вариант № 3) представляет собой промежуточный вариант между дроссельной схемой (вариант № 1) и схемой «насос — карман» (вариант № 4), что видно на графике зависимости для большой нагрузки (рис. 2, а): при действии нагрузки в сторону опоры с подачей масла от насоса зависимость (кривая 3) наиболее близка к зависимости для схемы «на-

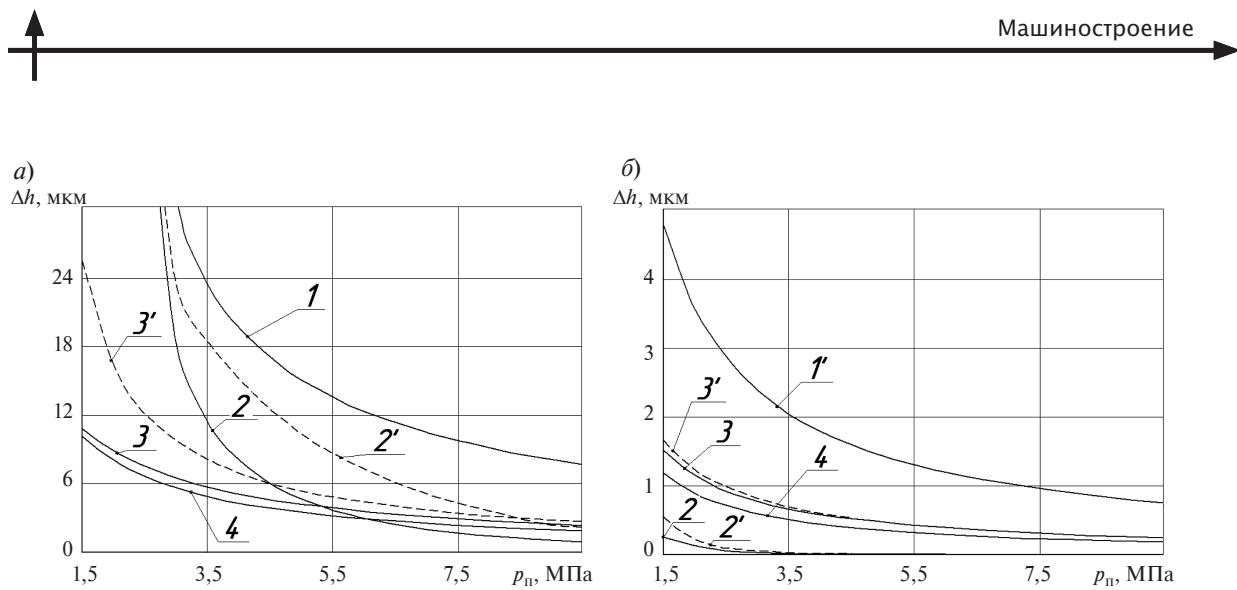


Рис. 2. Зависимость статической ошибки в опоре от величины давления питания:  
 $a$  — при больших нагрузках ( $P_Z = 10$  кН);  $\delta$  — при малых нагрузках ( $P_Z = 100$  Н)

сос — карман» (кривая 4), а при действии нагрузки в сторону опоры с дросселем (кривая 3') — к кривой 1 дроссельной схемы. Основная особенность схемы управления типа дроссель регулятор (вариант № 2) заключается в обеспечении нулевой статической ошибки (бесконечная жесткость) при малых нагрузках, где направление действия нагрузки (кривая 2 — при положительном действии нагрузки, 2' — при отрицательном) не оказывает существенного влияния (рис. 2, б). При больших нагрузках (рис. 2, а) наблюдается существенная крутизна статической характеристики в области низких давлений.

Определение давления питания  $p_n$  ГСП для каждой рассмотренной схемы управления опорами выполнено из условия обеспечения одинаковой статической ошибки ( $\Delta h = 8,5$  мкм), соответствующей базовому дроссельному варианту (вариант № 1) на станке ЛР520-ПМФ4. Причем для комбинированных схем (варианты

№ 2 и № 4) выбор давления произведен для случаев меньшей жесткости, т. е. при направлении действия нагрузки на опору с дросселем. Полученные результаты представлены в таблице.

Таким образом, относительно базового при любом из исследованных вариантов схем управления возможно существенное снижение уровня давления питания, т. е. потребляемого ШУ расхода рабочей жидкости, что, в свою очередь, упрощает конструктивную реализацию ее циркуляции.

Существенное значение при разработке ГСП и совершенствовании МРС приобретает анализ динамического качества системы автоматического регулирования (САР).

По известным линеаризованным математическим моделям ГСП, описывающим рассматриваемые варианты, были построены блок-схемы моделей для программного пакета MATLAB в среде Simulink. На рис. 3 в качестве примера приведена структурная схема разомкнутой

#### Значения расчетных параметров для исследования вариантов схем управления ГСП

Номер варианта	Схема	$\Delta\phi$ , град.	$C_A$ , $10^{-14} \text{ м}^3/\text{Па}$	$R_A$ , $10^9 \text{ Па}\cdot\text{с}/\text{м}^3$	$\Delta\phi_{\text{корр.}}$ , град.
1	Дроссельная	8,5	14	11	7,5
2	Дроссель — регулятор	5,6	23	19	6,5
3	Дроссель — «насос — карман»	3,4	16	11	7,5
4	«Насос — карман»	1,9	20	19	6,5

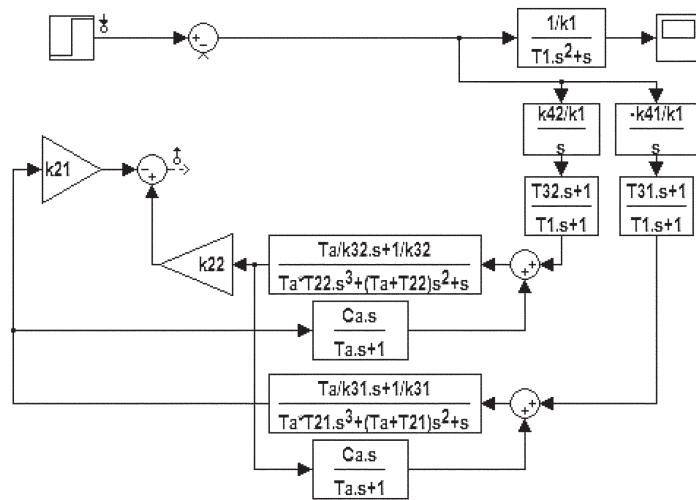


Рис. 3. Структурная блок-схема разомкнутой САР дроссельного ГСП с коррекцией  $RC$ -цепью

САР по варианту № 1. Для остальных вариантов отличие состоит в значениях некоторых расчетных параметров звеньев.

Выполнен анализ динамического качества для вариантов САР ГСП на основе логарифмических амплитудно-частотных (ЛАЧХ) и логарифмических фазочастотных характеристик (ЛФЧХ). На рис. 4, *a* показаны частотные характеристики ГСП для вариантов схем управления дроссельной (№ 1) и регуляторной (№ 2).

В табл. 1 приведены полученные значения запаса по фазе  $\Delta\phi$  для всех исследуемых вариантов. Типовой дроссельный вариант (№ 1) обладает наихудшим динамическим качеством,

хотя и для всех других  $\Delta\phi$  существенно ниже рекомендованных значений [4].

Выполнен расчет переходных процессов (ПП) с использованием исходных математических нелинейных моделей по разработанным структурным схемам в среде Simulink программного пакета MATLAB. На рис. 5 в качестве примера приведена структурная схема для исследования дроссельного ГСП (вариант № 1). Для остальных вариантов отличие состоит только лишь в значениях некоторых исходных и расчетных параметров схемы либо в дополнительных элементах структуры (для схемы с регулятором).

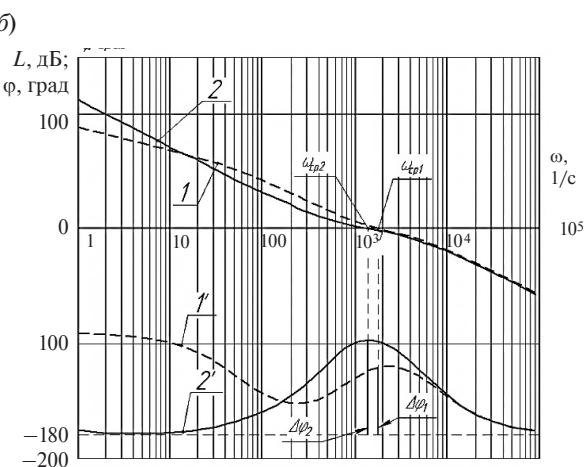
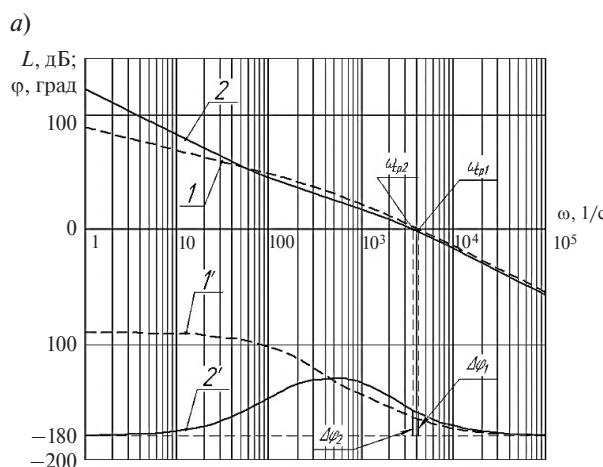


Рис. 4. ЛАЧХ и ЛФЧХ ГСП для вариантов систем управления дроссельной (1 и 1') и регуляторной (2 и 2'): *a* — без коррекции; *б* — с коррекцией  $RC$ -цепью

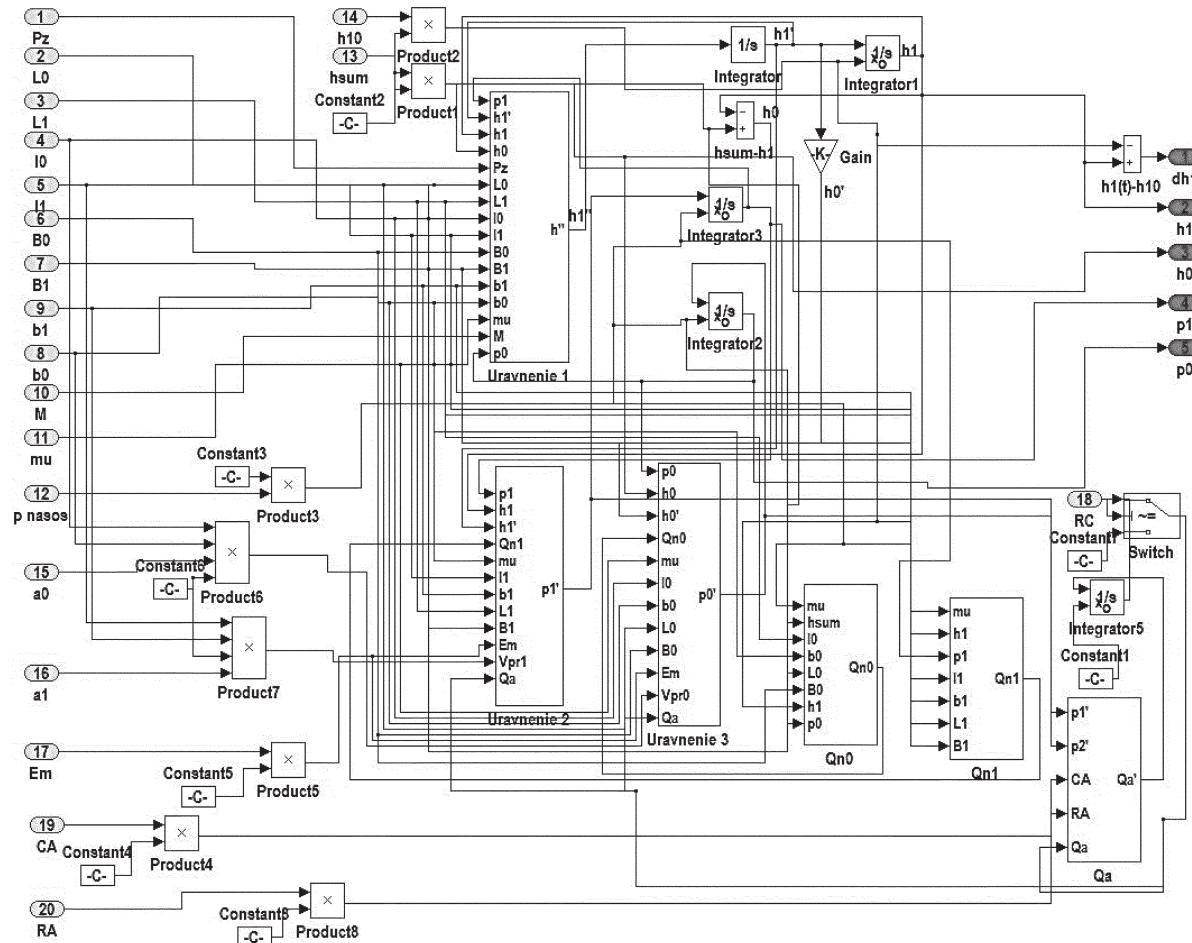


Рис. 5. Структурная схема дроссельного ГСП

Для ПП, построенных при малой нагрузке (рис. 6, а), колебательность проявляется при всех рассмотренных схемах управления ГСП, причем параметры колебательных движений примерно одинаковы.

В переходных процессах при большой нагрузке (рис. 6, б) колебательность практически исчезает вследствие влияния нелинейности исходных математических уравнений. Поскольку качество механической обработки определяется чистовыми режимами, актуально повышение динамического качества САР за счет введения коррекции с помощью  $RC$ -цепей, представляющих собой последовательно соединенные гидроемкость  $C_A$  и гидросопротивление  $R_A$ , включенные между противоположными опорами ГСП [5].

При варьировании параметров коррекции ( $C_A$  и  $R_A$ ) рассчитаны соответствующие ЛАЧХ

и ЛФЧХ. На рис. 4, б в качестве примера приведены такие характеристики для вариантов схем управления № 1 и № 2.

На частотах среза  $\omega_{cp}$  определены запасы по фазе  $\Delta\phi$  для рассматриваемых вариантов при варьировании значений  $C_A$  и  $R_A$ . По найденным запасам по фазе  $\Delta\phi$  для определения оптимальных параметров коррекции выполнено построение пространственных поверхностей запаса по фазе  $\Delta\phi = f(C_A; R_A)$ . На рис. 7 в качестве примера приведены поверхности  $\Delta\phi = f(C_A; R_A)$  для вариантов схем управления № 1 и № 2.

При выборе значения емкости следует учитывать:

ограничения по прочности сильфона;  
виброустойчивость на черновых режимах (достигаемое высокое качество на чистовых режимах может реализовываться при коррекции,

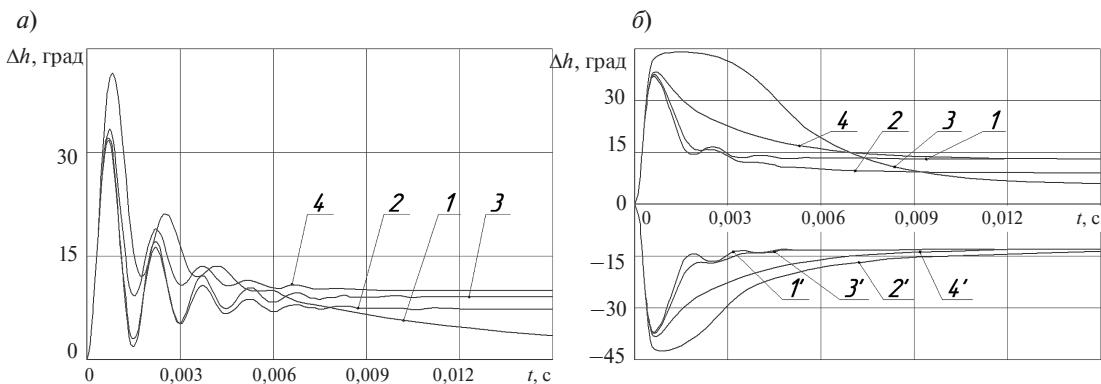


Рис. 6. Переходные процессы:  
а — при малых нагрузках ( $P_Z = 100$  Н); б — при больших нагрузках ( $P_Z = 10$  кН)

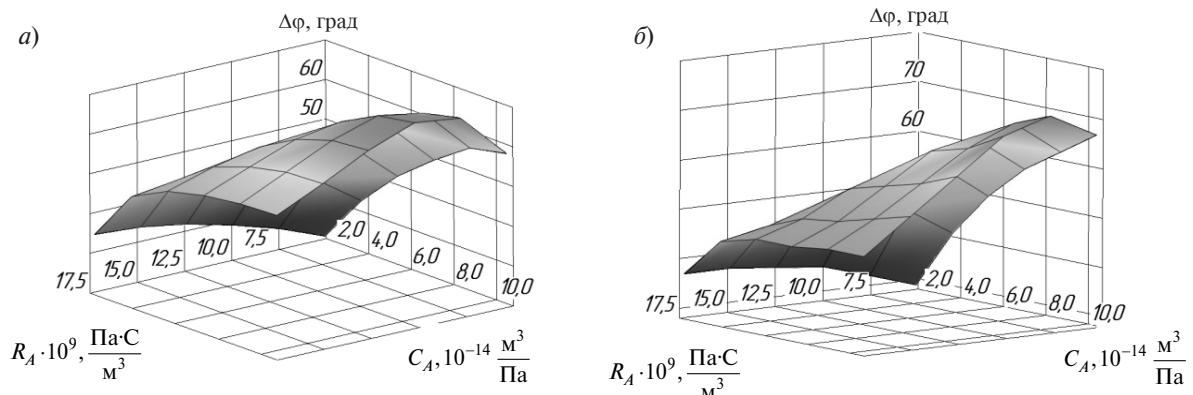


Рис. 7. Трехмерная зависимость  $\Delta\phi = f(C_A, R_A)$  для скорректированной  $RC$ -цепью САР:  
а — дроссельного ГСП; б — регуляторного ГСП

значительно ухудшающей виброустойчивость на черновых операциях, что негативно сказывается на общей производительности МРС);

положение максимума на соответствующих зависимостях  $\Delta\phi = f(R_A)$  для конкретных значений  $C_A$ .

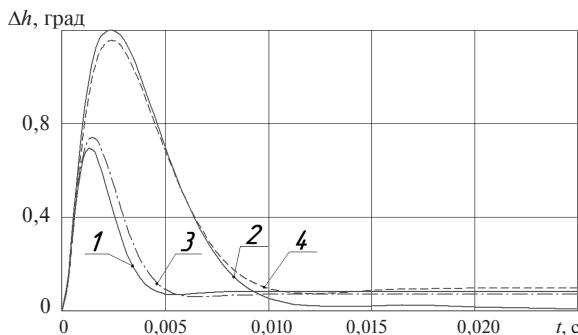


Рис. 8. Переходные процессы  
при малых нагрузках ( $P_Z = 100$  Н)

В качестве гидроемкости рассмотрен наиболее доступный, экономичный и технологически эффективный вариант — стандартный металлический сильфон (ГОСТ 21482-76).

Установленные при исследованиях значения оптимальных параметров  $C_A$  и  $R_A$  для вариантов управления приведены в табл. 1. Из анализа результатов следует, что наилучшее динамическое качество обеспечивается для вариантов № 2 и № 4, а наихудшим значением обладает базовый вариант (№ 1).

Максимальное значение  $\Delta\phi = 85^\circ$  получено для регуляторной (вариант № 2) САР с коррекцией  $RC$ -цепью. При введении в базовый дроссельный вариант (№ 1) САР коррекции  $RC$ -цепью запас по фазе возможно повысить до  $\Delta\phi = 60^\circ$ , что соответствует худшему динамическому качеству из всех вариантов. Таким образом, регуляторная САР (вариант № 2) с кор-

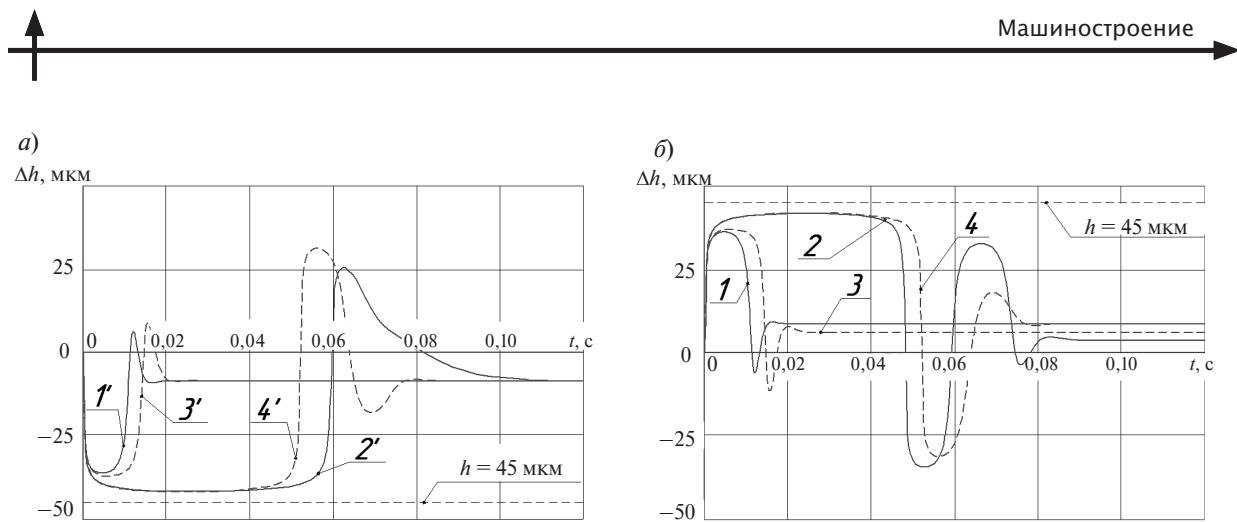


Рис. 9. Переходные процессы при больших нагрузках ( $P_z = 10$  кН):  
а — отрицательных; б — положительных

рекцией  $RC$ -цепью обладает наиболее высокими динамическими показателями.

Высокое динамическое качество [4] при введении  $RC$ -цепей коррекции для всех рассматриваемых схем иллюстрируют ПП, приведенные на рис. 8, построенные при малой нагрузке с использованием структуры соответствующих нелинейных моделей. Сопоставление с некорректированными вариантами (рис. 6, а) показывает отсутствие колебательности.

Как отмечено выше, окончательное решение по выбору параметров коррекции следует принимать из расчета и построения соответствующих ПП при больших нагрузках (рис. 9).

Из сопоставления с соответствующими ПП для САР без коррекции (рис. 6, б) следует, что для выбранных параметров коррекции качество ПП, хотя и ухудшается за счет проявления колебательности, но количественно оно не является критическим и существенно не сказывается на виброустойчивости при черновых режимах работы МРС.

Таким образом, запас по фазе для каждой рассматриваемой схемы управления после введения цепей коррекции соответствует значению для САР с хорошим качеством. Схема управления типа дроссель — регулятор (вариант № 2) обладает наибольшим запасом по фазе и более чем в полтора раза превосходит потенциальные возможности реализованной на станке традиционной дроссельной схемы с коррекцией. Окончательный выбор той или иной схемы управления ГСП необходимо делать на основании конкретных требований. Если предпочтительна статическая жесткость, то лучшим выбором будет схема дроссель — регулятор. Если приоритет отдается переходным процессам, то лучшим выбором будет схема дроссель — «насос — карман». По динамическим характеристикам схемы дроссель — «насос — карман» и дроссельная равнозначны, но по статике первая схема имеет лучшие показатели. Кроме того, при использовании схемы дроссель — «насос — карман» упрощается процесс предварительной настройки за счет уменьшения общего количества дросселей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушуев, В.В. Гидростатическая смазка в тяжелых станках [Текст] / В.В. Бушуев.— М.: Машиностроение, 1979.— 88 с.
2. Соколов, Ю.Н. Шпиндельные гидростатические подшипники. Расчет и проектирование [Текст]: Рекомендации / Ю.Н. Соколов, А.Ф. Гордеев / ЭНИМС.— М., 1969.— 72 с.
3. Шпиндельные узлы на гидростатических опорах— Hydrostatische spindeln [Текст]: пер. с нем. // Produktion.— 1995. № 48.— С. 12.
4. Иващенко, Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем [Текст]: Учебник для вузов / Н.Н. Иващенко.— Изд. 4, перераб. и доп.— М.: Машиностроение, 1978.— С. 736.
5. Бундур, М.С. Расчетно-аналитические особенности проектирования гидростатических подшипников для станочного оборудования [Текст] / М.С. Бундур, В.А. Прокопенко, И.А. Чернов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2009. № 1.— С. 72–77.



УДК 621.914.2.02:691.328

А.И. Фоломкин, С.Л. Мурашкин

## ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТОРЦОВЫХ ФРЕЗ С КОРПУСАМИ ИЗ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА

Одна из характерных тенденций развития технологических систем — увеличение скоростей резания. Это приводит к снижению запаса устойчивости технологических систем из-за сближения частоты возмущающей силы с собственными частотами колебаний в системе, что вызывает увеличение амплитуды относительных колебаний режущего инструмента и заготовки. Возникновение колебаний в технологической системе приводит к снижению качества поверхности детали, уменьшает стойкость инструмента, увеличивает износ станка, является причиной повышенного уровня шума.

В свою очередь, повышение скорости резания при фрезеровании приводит к увеличению ударных нагрузок на режущие кромки, что не позволяет использовать некоторые износостойкие, но хрупкие инструментальные материалы.

Известны конструкции инструмента, которые демпфируют колебания режущих кромок, однако многие из них существенно снижают жесткость инструмента, нетехнологичны, поэтому они не получили широкого распространения. Кроме того, при изготовлении фрез существенной проблемой является обеспечение минимального биения режущих кромок относительно оси вращения.

Один из путей совершенствования конструкций режущего инструмента — применение композиционных материалов для изготовления корпусов инструмента. Однако уже разработанные конструкции инструментов из композиционных материалов остаются нетехнологичными и не решают проблемы изготовления качественного и надежного инструмента.

Обе проблемы удается решить при изготовлении корпусов торцовых фрез из стальфибробетона. Существенная особенность таких конструкций — уменьшение ударных нагрузок и вибраций за счет высоких демпфирующих характеристик стальфибробетона. Кроме того, простота конструкции и технологии изготовле-

ния таких фрез позволяют сократить до минимума издержки при их производстве.

Анализ научно-технической литературы показал, что прерывистый характер процесса резания при фрезеровании вызывает существенные ударные нагрузки на режущую кромку инструмента, что затрудняет использование таких перспективных инструментальных материалов, как безвольфрамовые твердые сплавы, которые отличаются высокой износостойкостью, но хрупки. Применение этих материалов особенно затруднительно при обработке высокопрочных материалов. Установлено, что разработка новых конструкций фрез, обеспечивающих эффективное демпфирование ударных нагрузок и вибраций при резании, — достаточно актуальная задача.

Кроме того, весьма важно для снижения нагрузки на режущие кромки фрез создать технологичные конструкции инструмента с пониженным биением режущей кромки.

Наиболее перспективно для использования в машиностроении применение стальфибробетона, армированного фиброй вибрационного точения. Стальные волокна (фибра), получаемые вибрационным точением по способу, предложенному в СПбГПУ, отличаются чрезвычайной дисперсностью (площадь поперечного сечения от 0,01  $\text{мм}^2$ ), что позволяет создавать стальфибробетонные композиции с уникальными физико-механическими свойствами.

Для эффективного проектирования фрез необходимо иметь модель, позволяющую определять свойства высоконаполненного стальфибробетона и его оптимальный состав. Для этих целей автором разработана экспериментальная модель предела прочности материала, армированного фиброй вибрационного точения:

$$\sigma_{\text{сж}} = 49 + 4L + 1,25 \cdot 10^3 \xi_m - 1,03 \cdot 10^3 S, \quad (1)$$

где  $L$  — длина волокна;  $S$  — площадь поперечного сечения волокна;  $\xi_m$  — массовая концентрация волокон.



Установлено, что оптимизацией состава ста-лефибробетона его прочность на сжатие может быть приближена к прочности серого чугуна.

Оптимизация состава ста-лефибробетона исходя из требований максимального демпфи-рования при заданной прочности показала, что оптимальным составом материала для изгото-вления корпусов фрез с диаметрами менее 200 мм является ста-лефибробетон с параметрами:  $L = 5$  мм,  $S = 0,026$  мм<sup>2</sup>,  $\xi_m = 18\%$ . Декремент продольных колебаний такого ста-лефибробе-тона достигает величины 0,34 неп. При этом удельный коэффициент вязкости такого мате-риала составляет  $k_{ob} = 6,8 \cdot 10^5$  Н·с/м<sup>4</sup>.

На рис. 1 показана конструкция фрезы и схе-ма формовки ста-лефибробетонного корпуса. Фреза состоит из твердосплавных пластин 2, державок 1, втулки 4, обечайки 6. При сборке такой фрезы режущие кромки при помощи специаль-ного приспособления 3 предварительно устанав-ливаются и фиксируются в положении, обес-печивающем их минимальное биение. Основной объем корпуса и промежутки между державками режущих элементов заполняются ста-лефибробе-тона смесью 5, отвердевание которой обес-печивает их закрепление.

Общая методика проектирования фрез с кор-пусами из ста-лефибробетона предполагает сле-дующие основные этапы:

определение в соответствии с существующи-ми методиками геометрии режущей части ин-струмента, выбор количества  $z$  зубьев фрезы и ее диаметра  $D$ ;

выбор геометрии поперечного сечения державок;

определение высоты обечайки фрезы исходя из состава ста-лефибробетона и выбор анкирую-щих элементов;

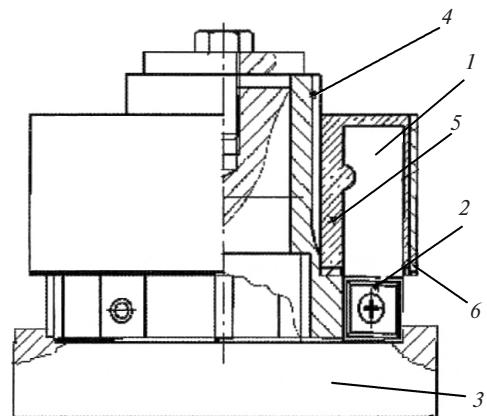


Рис. 1. Общая конструкция фрезы  
с корпусом из ста-лефибробетона

построение трехмерной модели фрезы и про-верка ее на прочность и жесткость.

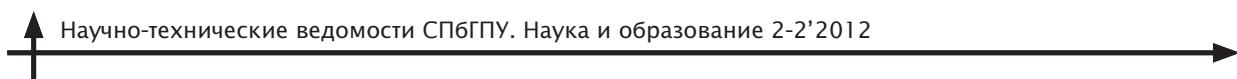
Расчеты, проведенные методом конечных элемен-тов, показали, что наиболее благопри-ятно напряжения в корпусе торцовой фрезы распределены в случае применения державок круглого поперечного сечения. Наименее благоприятно напряжения распределены в корпу-сах с державками треугольного поперечного сечения. В корпушах с державками прямоуголь-ного и шестиугольного поперечного сечения напряжения распределены примерно одинаково. По интенсивности напряжений в опасных зонах эти корпушки занимают промежуточное положение между корпушами с державками тре-угольного сечения и с державками круглого сечения.

В процессе численного моделирования была определена также жесткость корпуш с держав-ками различной геометрии (табл. 1). Наиболее жесткими и прочными державками, обес-печивающими и большую прочность корпуша, явля-

Таблица 1

Коэффициент жесткости  
для корпуш с державками различного поперечного сечения

Геометрия поперечного сечения державки	Максимальное перемещение, м, режущей кромки при нагрузке $P = 1600$ Н	Коэффициент жесткости, Н/м
Треугольник	$7,07 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{17}$
Квадрат	$3,405 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{17}$
Шестиугольник	$3,585 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{17}$
Круг	$2,212 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{17}$



ются державки круглого и прямоугольного по-перечного сечения. Кроме того, такие державки более технологичны в изготовлении.

Для проектирования фрез с корпусами из стальфибробетона важно определить высоту  $H_1$  корпуса фрезы. От этого размера в значительной степени зависит прочность и жесткость фрезы, а также габариты, масса и, как следствие, инерционность корпуса. Для определения оптимального размера высоты  $H_1$  был использован статический анализ (COSMOSWorks) и алгоритм метода половинного деления. Получение решения поставленной задачи для некоторых размеров фрез представлены в табл. 2.

Прочностные расчеты методом конечных элементов показали, что по торцу державок, противоположному месту закрепления режущих элементов, следует предусматривать слой стальфибробетона не менее 5 мм.

Высокий уровень напряжений и деформаций в местах контакта державок и матрицы не должен нарушать механический и адгезионный контакт между ними. В связи с этим для более надежной фиксации державок в корпусе целесообразно предусматривать анкирующие элементы.

Одной из основных задач при проектировании фрез является определение оптимальных геометрических размеров державок, обеспечивающих максимальное демпфирование колебаний, которые возникают в технологической си-

Таблица 2  
Характеристики для различных диаметров  $D_1$  фрез

$D_1$ , мм	$P_z$ , Н	$H_1$ , мм
100	1600	40
125	2000	45
160	2560	52
200	3200	64

стеме. При моделировании было установлено: чем меньше масса державки, тем больше логарифмический декремент колебаний конструкции. Полученные результаты позволили рекомендовать применение полых державок, что незначительно снижает их прочность и жесткость, но значительно повышает демпфирующую способность конструкции.

Многолетние испытания на виброустойчивость фрез с корпусами из предлагаемого материала и полученные при этом теоретические и экспериментальные виброграммы позволяют сделать вывод о том, что колебания режущей кромки в стальфибробетонном корпусе затухают за время, равное  $\frac{1}{4}$  времени действия силы, в то время как затухание в стальном корпусе происходит все время действия силы резания. Амплитуда колебаний режущей кромки в стальфибробетонном корпусе в 2–3 раза меньше, чем в стальном корпусе.

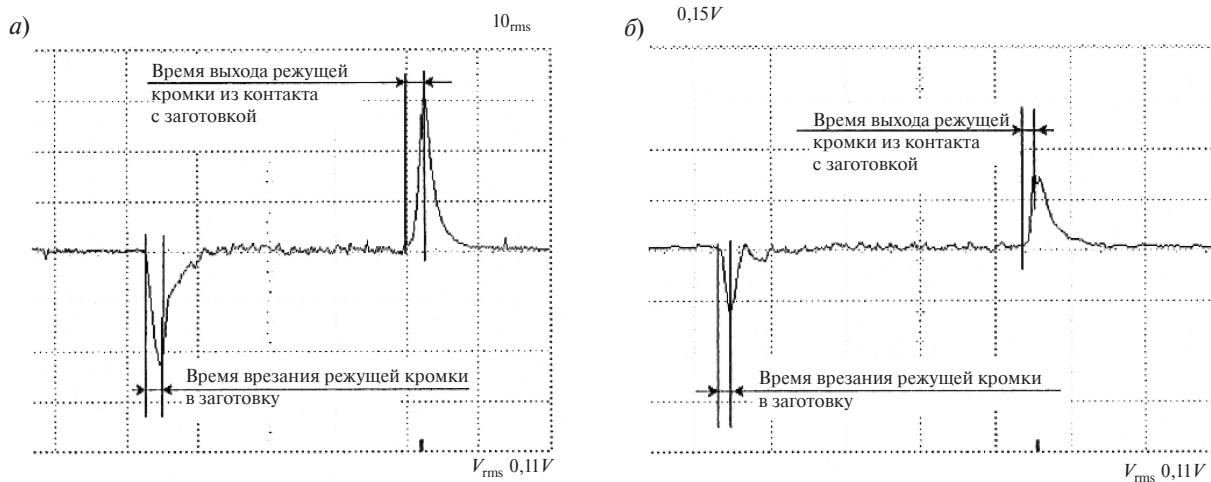


Рис. 2. Осциллограммы изменения переходных динамических процессов при скорости резания  $V = 250$  м/мин,  $s = 50$  мм/мин,  $t = 2$  мм:

*a* — для корпуса из стали; *б* — для корпуса из стальфибробетона



Исследование влияния быстропротекающих ударных процессов на режущую кромку (рис. 2) производились при помощи пьезоэлектрических датчиков, устанавливаемых под твердосплавные пластины. Экспериментальным путем установлено, что применение корпусов фрез из стальфибробетона снижает ударные нагрузки на лезвие инструмента в 1,5–2 раза.

При использовании фрез с корпусами из стальфибробетона стойкость режущих лезвий в зависимости от скорости резания можно повысить до двух раз по сравнению с фрезами с корпусами из стали (рис. 3).

Таким образом, при использовании фрез с корпусами из стальфибробетона производительность процесса резания за счет скорости резания может быть увеличена до 20 %. Демпфирование ударных нагрузок снижает циклические напряжения в инструментальном материале, что значительно увеличивает стойкость инструментального материала. Проведенные исследования показали, что при использовании конструкций фрез с корпусами из стальфибро-

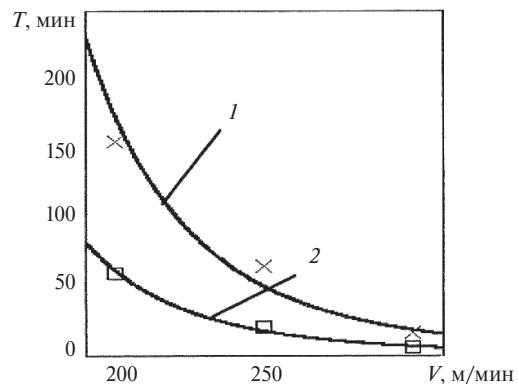


Рис. 3. Зависимость стойкости фрез от скорости резания:

1 — с корпусом из стальфибробетона;  
2 — с корпусом из стали

бетона стойкость режущих кромок увеличивается в 1,4–2 раза. Кроме того, применение корпусов фрез из стальфибробетона позволяет за счет демпфирования ударных нагрузок использовать твердые, но хрупкие инструментальные материалы, такие, как безвольфрамовые металлокерамические твердые сплавы и другие сверхтвёрдые материалы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротких, М.Т. Конструкционные особенности торцовых фрез с корпусами из стальфибробетона [Текст] / М.Т. Коротких, А.И. Фоломкин // Металлообработка.— 2005. № 4.— С. 8–11.

2. Брайловский, М.И. Сталебетонные станины современных высокоточных токарных станков без внешней металлической оболочки [Текст] / М.И. Брайловский, А.М. Интин // Вестник машиностроения.— 2003. № 7. — С 64–68.

УДК 621.51

А.В. Зуев, В.К. Юн, М.А. Фафинов

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУХИХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ УПЛОТНЕНИЙ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАГНЕТАТЕЛЯХ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Сухие газодинамические уплотнения (СГУ) нашли широкое применение в центробежных компрессорах. Преимущества СГУ перед масляными уплотнениями неоспоримы: низкие капитальные затраты; отсутствие загрязнения рабочего газа маслом; уменьшение механических потерь мощности; высокая надежность

работы; снижение издержек на обслуживание; большой срок службы.

СГУ представляют собой упорный подшипник с глухими канавками глубиной 2–10 мкм и щелевое торцевое уплотнение с малым осевым зазором. Течение газа в щели СГУ происходит в радиальном направлении от периферии к цен-



тру. Канавки на вращающемся кольце обеспечивают появление осевой силы, которая препятствует соприкосновению пар трения — неподвижного подпружиненного и вращающегося колец.

В уплотнение подается буферный газ, предварительно очищенный от твердых частиц размерами более 5 мкм. При пуске центробежного нагнетателя на участке с канавками, начинающимся от входного радиуса  $r_1$  и заканчивающимся на радиусе  $r_2$ , возникает осевое усилие, превосходящее постоянное усилие пружины. Образовавшийся зазор между неподвижным и вращающимся кольцами обеспечивает «сухое» трение. Бесканавочный участок от радиуса  $r_2$  до выходного радиуса  $r_3$  оказывает большое сопротивление газу, что предотвращает большие протечки. В зависимости от типов канавок (реверсивные и нереверсивные) осевое усилие может быть различным, вследствие чего в момент пуска центробежного компрессора происходит наибольший износ пар трения.

Равновесие неподвижного подпружиненного кольца 1 (см. рис. 1) определяется условием

$$\pi(r_1^2 - r_y^2)p_1 + \pi(r_y^2 - r_3^2)p_3 + P_{\text{упр}} = P(H). \quad (1)$$

Здесь  $p_1$  — начальное давление газа перед уплотнением;  $p_3$  — давление газа на выходе из уплотнения;  $P_{\text{упр}}$  — упругая сила, зависящая от жесткости пружин 3 и полимерного уплотняющего

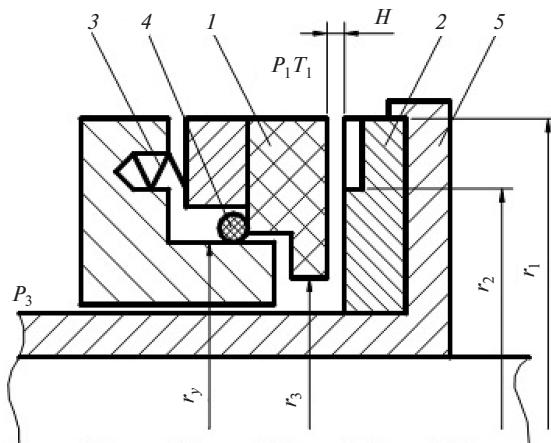


Рис. 1. Схема СГУ:

1 — подпружиненное невращающееся кольцо; 2 — вращающееся кольцо; 3 — пружины; 4 — уплотнительное кольцо; 5 — прочная стальная обойма;  $r_1$  — наружный радиус вращающегося кольца;  $r_3$  — внутренний радиус уплотнения;  $r_y$  — радиус; уплотняемый

кольца 4;  $H$  — зазор в уплотнении;  $P$  — распорная сила,

$$P = 2\pi \int_{r_3}^{r_1} pr dr. \quad (2)$$

Оценка величины распорной силы  $P$  может производиться по значениям безразмерного коэффициента этой силы

$$\bar{P} = \int_{x_3}^1 \bar{p} dx, \quad (3)$$

$$\text{где } \bar{p} = p/p_1, x = (r/r_1)^2.$$

Соотношение (1) связывает давления перед и за уплотнением ( $p_1$  и  $p_3$ ), упругую силу  $P_{\text{упр}}$  и зазор в уплотнении  $H$ .

Равновесие будет устойчивым при  $P = P_{\text{нап}}$ , где  $P_{\text{нап}}$  — наружная сила, приложенная к вращающемуся кольцу со стороны ротора центробежного компрессора. Зазор  $H$  будет сохраняться до тех пор, пока увеличению  $P$  будет соответствовать рост распорной силы при уменьшении  $H$ , т. е. пока выполняется условие

$$K_{\text{уст}} = -\frac{dP}{dH} > 0. \quad (4)$$

Чем больше оказывается коэффициент устойчивости  $K_{\text{уст}}$ , тем меньше окажется изменение  $H$  при изменении наружной силы  $P_{\text{нап}}$ .

Для оценки несущей способности пар трения нереверсивного и реверсивного типов уплотнений в момент пуска центробежного компрессора и при стационарном режиме на nominalных оборотах приведем расчет СГУ по разработанной методике [1].

Наиболее распространенные формы канавок СГУ — спиральные (нереверсивные) и трапециевидные (реверсивные).

#### Расчет СГУ со спиральными канавками

СГУ со спиральными канавками фирмы «Джон Крейн» показаны на рис. 2.

#### Определение термогазодинамических параметров газа перед уплотнением

По известному составу газа определяем газовую постоянную смеси

$$R = 8314,51/M, \quad (5)$$

где  $M$  — молярная масса газа (смеси).



Для заданных значений начального давления и температуры по термическому уравнению состояния находим начальное значение коэффициента сжимаемости  $Z_1$  [2–4].

Имея значение коэффициента сжимаемости газа, находим начальное значение плотности газа

$$\rho_1 = p_1 / (Z_1 R T_1). \quad (6)$$

Начальная удельная изобарная теплоемкость  $c_{p1}$  определяется суммой теплоемкости в идеально-газовом состоянии  $c_{p0}$  и изотермической добавки  $\Delta c_p$ :

$$c_{p1} = c_{p0} + \Delta c_p. \quad (7)$$

Удельная изобарная теплоемкость газа в идеально-газовом состоянии находится по формуле

$$c_{p0} = \frac{\sum_j^l r_j m_j c_{pj0}}{M}, \quad (8)$$

где  $m_j$  — молярная масса компонента смеси,  $r_j$  — объемная концентрация компонентов смеси,  $c_{pj0} = a_j + b_j T + c_j T^2 + d_j T^3$ ;  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $c_j$ ,  $d_j$  — коэффициенты для веществ, взятые из справочника [2].

Изотермическая добавка удельной изобарной теплоемкости  $\Delta c_p$  определяется с использованием термического уравнения состояния [2–4]. Для совершенных газов удельную изобарную теплоемкость можно принимать равной удельной изобарной теплоемкости в идеально-газовом состоянии  $c_{p1} = c_{p0}$ .

Метод определения динамической вязкости смеси, предложенный Дином и Стилом, учитывает влияние давления [2]:

$$(\mu - \mu_0) \xi_m = 1,08 \left[ e^{1,439 \rho_{rm}} - e^{-1,11 \rho_{rm}^{1.858}} \right], \quad (9)$$

где  $\mu$  — вязкость смеси при высоком давлении;  $\mu_0$  — вязкость смеси при низком давлении;  $\rho_{rm} = \rho_1 / \rho_{kp}$  — псевдоприведенная плотность смеси;  $\rho_1$  — плотность смеси при начальных условиях;  $\rho_{kp} = p_{kp} / (Z_{kp} R T_{kp})$  — псевдокритическая плотность смеси;

$$\mu_0 = \begin{cases} \frac{3,4 T_{\Gamma}^{8/9}}{\xi_m} & \text{при } T_{\Gamma} \leq 1,5; \\ 16,68(0,1338 T_{\Gamma} - 0,0932)^{5/9} & \text{при } T_{\Gamma} > 1,5, \end{cases} \quad (10)$$

где  $T_{\Gamma} = T_1 / T_{kp}$  — псевдокритическая температура смеси.

Можно воспользоваться и другой зависимостью определения динамической вязкости — формулой Сазерленда при давлении близком к атмосферному [4]:

$$\mu = \mu_0 \frac{C + T_0}{T + C} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2}, \quad (11)$$

где  $\mu_0$  — динамическая вязкость смеси при 273 К и 0,1013 МПа;  $C$  — постоянная Сазерленда, различная для разных газов (для воздуха  $C = 122$  К);  $T_0 = 273,15$  К.

При низких давлениях вместо формулы Сазерленда широко используются степенные формулы вида

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^n, \quad (12)$$

где  $n$  — показатель степени (выбирается в зависимости от диапазона температуры; для воздуха обычно  $n = 1; 0,75; 0,5; 0$ ).

Определение теплопроводности смеси при влиянии высокого давления наиболее точно отражено в методе, предложенным Стилом и Тодесом для чистых компонентов [2]. Однако если смесь рассматривать как гипотетически чистый компонент с псевдокритическими свойствами, то можно воспользоваться формулами

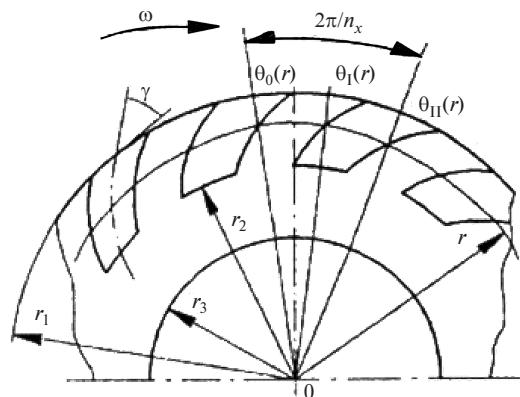


Рис. 2. СГУ со спиральными канавками:  $\gamma$  — угол наклона канавок;  $(\Theta_1 - \Theta_0)$  — угловая протяженность межканавочного промежутка;  $(\Theta_{II} - \Theta_I)$  — угловая протяженность канавочного промежутка;  $\Delta h$  — глубина канавок;  $n_k$  — число канавок;  $\omega$  — угловая скорость вращения ротора

$$(\lambda - \lambda^0) \Gamma Z_{kp}^5 = (14,0 \cdot 10^{-8}) (e^{0,535 \rho_{rm}} - 1)$$

при  $\rho_{rm} < 0,5$ ;

$$(\lambda - \lambda^0) \Gamma Z_{kp}^5 = (13,1 \cdot 10^{-8}) (e^{0,67 \rho_{rm}} - 1,069)$$

при  $0,5 < \rho_{rm} < 2,0$ ;

$$(\lambda - \lambda^0) \Gamma Z_{kp}^5 = (2,976 \cdot 10^{-8}) (e^{1,115 \rho_{rm}} + 2,016)$$

при  $2,0 < \rho_{rm} < 2,8$ , (13)

где  $\lambda_0$  — значение теплопроводности при той же температуре при низком давлении;  $\lambda_0 = (14,52 T_g - 5,14)^{2/3} \frac{c_p}{\Gamma}$ ;  $\Gamma = \frac{T_{kp}^{1/6} M^{1/2}}{p_{kp}^{2/3}}$ ;  $Z_{kp} = \frac{p_{kp}}{\rho_{kp} R T_{kp}}$ ;  $c_p$  — мольная изобарная теплоемкость газа;  $\rho_{rm}$  — псевдокритическая плотность смеси.

Таким образом, перед тем как будет известна геометрия канавок для расчета распределения температуры и давления в уплотнении, определены термогазодинамические параметры газа:  $R$ ,  $Z_1$ ,  $\rho_1$ ,  $c_{p1}$ ,  $\mu_1$ ,  $\lambda_1$ .

### Определение геометрии канавок и безразмерных коэффициентов

**Геометрия спиральной канавки.** Угол  $\Theta$  будем отсчитывать от некоторой начальной границы  $\Theta_0(r)$  при переходе от канавки к межканавочному промежутку. Межканавочный промежуток заканчивается при  $\Theta = \Theta_1(r)$ , что соответствует границе этой канавки, т. е. переходу к следующему межканавочному промежутку:

$$\Theta_{II}(r) \Theta_0(r) + 2\pi/n_k, \quad (14)$$

где  $n_k$  — число канавок.

Угловая протяженность межканавочного промежутка равна

$$v_I = \Theta_1 - \Theta_0. \quad (15)$$

а угловая протяженность канавки

$$v_{II} = \Theta_{II} - \Theta_0 = 2\pi/n_k - v_I. \quad (16)$$

Относительная угловая протяженность межканавочного промежутка составит

$$\beta = v_I n_k / (2\pi), \quad (17)$$

а относительная угловая протяженность канавки

$$1 - \beta = v_{II} n_k / (2\pi). \quad (18)$$

В общем случае все эти величины являются функцией радиуса  $r$ . Спиральные канавки очерчены дугой логарифмической спирали с постоянной угловой шириной  $\frac{d\Theta_1}{dr} = \frac{d\Theta_0}{dr}$ , соответственно:

$$\frac{d\Theta_0}{dr} = \frac{n_k \operatorname{ctg} \gamma}{2\pi} \frac{r}{r_1}, \quad (19)$$

где  $\bar{r} = \frac{r}{r_1}$  — относительный радиус.

Относительная высота щели над канавкой равна

$$\eta = (H + \Delta h) / H. \quad (20)$$

**Безразмерные коэффициенты.** Основные выводы уравнений, описывающих течение газа в узкой щели, и их преобразования даны в работах [1, 4, 5]. В них приведены безразмерные коэффициенты и критерии подобия в конечном виде:

число сжимаемости (число Гаррисона)

$$\Lambda_1 = \frac{6\mu_1 \omega r_1^2}{H^2 p_1}; \quad (21)$$

число сжимаемости, подсчитанное по окружному шагу  $L_1 = 2\pi r_1 / n_k$ ,

$$\Lambda_{1L} = \frac{12\pi\mu_1 \omega r_1^2}{n_k H^2 p_1}; \quad (22)$$

относительная ширина щели

$$\Psi_1 = \frac{H}{r_1}; \quad (23)$$

безразмерная окружная скорость

$$M_{\omega 1} = \frac{\omega r_1}{\sqrt{k_1 R Z_1 T_1}}, \quad (24)$$

где  $k_1$  — показатель адиабаты газа;

безразмерная радиальная скорость

$$M_1 = \frac{u_{cp}}{\sqrt{k_1 R Z_1 T_1}}, \quad (25)$$

где  $u_{cp}$  — среднее значение радиальной составляющей скорости при входе в уплотнение. Так как течение газа протекает от периферии к центру, то безразмерная радиальная скорость будет иметь отрицательное значение (при расчете СГУ значением  $M_1$  необходимо задаваться до достижения критического истечения из щели или же достижения давления  $p_3$  на выходе из



уплотнения; в зависимости от принятого значения ширины щели  $H$  оно меняется —  $M_1 = -(0,005-0,05)$ .

При выводах основных уравнений, описывающих течение газа в щели, использовались безразмерные величины, соответствующие обозначениям в работе [1]:

$$\Omega_1 = \frac{3}{20} (k_1 - 1) M_{\omega 1}^2; \quad (26)$$

$$C_1 = \frac{10}{3\psi_1 \operatorname{Re}_1 M_1 [\beta_1 + \eta(1-\beta_1)]}; \quad (27)$$

$$E_1 = \beta_1 + \frac{1-\beta_1}{\eta} + \frac{3(\eta-1)^2 \beta_1 (1-\beta_1)}{\eta^3 \beta_1 + 1 - \beta_1}. \quad (28)$$

Следует отметить, что индексы при коэффициентах соответствуют определенным участкам щели: 1 — относится к начальным параметрам перед уплотнением, 2 — к концу участка с канавками, 3 — к концу бесканавочного участка или выходным параметрам). Коэффициенты  $\Omega$ ,  $C$ ,  $E$  меняются в зависимости от изменения радиуса  $r$  и величины относительной угловой протяженности межканавочного промежутка  $\beta$  (для спиральных канавок они постоянны, так как  $\beta = \operatorname{const}$ );

$$D_1 = \frac{3}{20 \operatorname{Pr}_1} \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} K_1 d\Theta, \quad (29)$$

Коэффициент  $D_1$  характеризует теплоотвод от газа в щели через вращающееся кольцо; он зависит от среднего по окружности коэффициента теплопередачи  $K_1$  от газа в щели к среде окружающей вращающееся кольцо снаружи. Ширина щели  $H$  мала по сравнению с радиальной протяженностью  $r$  и окружной протяженностью  $r\psi_1$  и  $r\psi_{11}$ . Поэтому критерий Нуссельта со стороны узкого зазора допустимо принять таким же, как в случае стабилизированного течения в узкой плоской щели при теплопередаче через одну ее стенку [6]:

$$\operatorname{Nu} = \alpha H / \lambda_1 = 2,43. \quad (30)$$

Для межканавочного промежутка при  $\Theta_0 \leq \Theta \leq \Theta_1$  коэффициент теплоотдачи от газа к вращающемуся кольцу равен

$$\alpha_{0-I} = 2,43 \lambda_1 / H, \quad (31)$$

а для стенок канавки при  $\Theta_1 \leq \Theta \leq \Theta_{II}$ , соответственно,

$$\alpha_{I-II} = 2,43 \lambda_1 / (\eta H). \quad (32)$$

Оба коэффициента теплоотдачи, как  $\alpha_{0-I}$ , так и  $\alpha_{I-II}$ , при малых  $H$  оказываются высокими. Вращающееся кольцо, состоящее из высокотеплопроводного и обладающего высокой твердостью кольца с канавками и прочной стальной обоймы, будем рассматривать как двухслойную плоскую стенку.

При  $\Theta_0 \leq \Theta \leq \Theta_1$  коэффициент теплопроводности равен

$$\kappa_{0-I} = \left( \frac{1}{\alpha_{0-I}} + \frac{b^*}{\lambda^*} + \frac{b^{**}}{\lambda^{**}} + \frac{1}{\alpha_{oc}} \right)^{-1}, \quad (33)$$

где  $b^*$  и  $b^{**}$  — толщины соответственно вращающегося кольца и обоймы;  $\lambda^*$  и  $\lambda^{**}$  — коэффициенты теплопроводности соответственно вращающегося кольца и обоймы;  $\alpha_{oc}$  — коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стальной обоймы в окружающую ее среду с температурой  $T_1$ .

При  $\Theta_1 \leq \Theta \leq \Theta_{II}$  имеем

$$\kappa_{I-II} = \left( \frac{1}{\alpha_{I-II}} + \frac{b^*}{\lambda^*} + \frac{b^{**}}{\lambda^{**}} + \frac{1}{\alpha_{oc}} \right)^{-1}. \quad (34)$$

При турбулентном течении около вращающегося диска при логарифмическом профиле скоростей согласно [7] связь между местным числом Нуссельта  $\operatorname{Nu}_{oc} = \alpha_{oc} r / \lambda_1$  и характерным местным числом Рейнольдса  $\operatorname{Re}_{oc} = \rho_1 \omega r^2 / \mu_1$  выражается соотношением

$$\operatorname{Nu}_{oc} = 0,0212 (n_T + 2,6)^{0,2} \operatorname{Pr}_{oc}^{0,6} \operatorname{Re}_{oc}^{0,8}, \quad (35)$$

в котором  $n_T$  — показатель степени при степенном распределении температуры вдоль радиуса диска (при квадратичном распределении температуры вдоль радиуса  $n_T = 2$ ).

Тогда коэффициент теплоотдачи равен

$$\alpha_{oc} = \alpha_{oc1} r^{-0,6}, \quad (36)$$

где

$$\alpha_{oc1} = 0,0212 (n_T + 2,6)^{0,2} \lambda_1^{0,4} \mu_1^{-0,2} c_{pl}^{0,6} (\omega \rho_1)^{0,8} r_1^{0,6}.$$

После некоторых преобразований получим окончательно

$$D_1 = \frac{3}{20} \frac{H}{\lambda_1 \operatorname{Pr}_1} [\beta_1 \kappa_{0-I} + (1-\beta_1) \kappa_{I-II}]. \quad (37)$$



При расчете безразмерных коэффициентов и критериев подобия необходимо учитывать знаки (минус — течение от периферии к центру, плюс — от центра к периферии) и размерности величин, входящих в безразмерные комплексы.

### Расчет температуры на участке с канавками

Уравнение энергетического баланса в дифференциальной форме и его упрощение, а также преобразование дано в [1]. Приведем готовое решение уравнения энергетического баланса в интегральной форме, когда вязкостная зависимость принята в виде формулы (12):

при изовязкостном течении ( $n = 0$ )

$$\bar{T} = e^{-C_1 D_1 (x-1)} \left[ 1 + C_1 \int_1^x (\Omega_1 E_1 x + D_1) e^{C_1 D_1 (x-1)} dx \right], \quad (38)$$

где  $\bar{T} = \frac{T}{T_1}$ , а интеграл вида  $\int_1^x (\Omega_1 E_1 x + D_1) e^{C_1 D_1 (x-1)} dx$

можно решить численно. После вычисления интеграла решение будет выглядеть таким образом:

$$\bar{T} = 1 + \frac{\Omega_1 E_1}{D_1} \left[ \left( 1 - \frac{1}{C_1 D_1} \right) \left( 1 - e^{C_1 D_1 (1-x)} \right) - (1-x) \right]; \quad (39)$$

при линейной зависимости вязкости от температуры ( $n = 1$ )

$$\bar{T} = e^{-F} \left( 1 + C_1 D_1 \int_1^x e^F dx \right), \quad (40)$$

причем

$$F = C_1 \int_1^x (D_1 - \Omega_1 E_1 x) dx.$$

Найти интегралы такого вида можно с помощью интеграла Досона [8], однако решение может быть найдено и численным интегрированием. Если применить интеграл Досона, то решение будет выглядеть так:

$$a = \sqrt{-\frac{C_1 \Omega_1 E_1}{2}}; \quad b = \frac{C_1 D_1}{2a};$$

$$\zeta_1 = ax + b; \quad \zeta_2 = a + b; \quad \zeta_3 = \zeta_1^2 - \zeta_2^2;$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{\zeta_2^2}; \quad \sigma_2 = \frac{1}{\zeta_1^2};$$

$$\xi_1 = 0,2518988 \sigma_1; \quad \xi_2 = 0,2518988 \sigma_2;$$

$$\Psi_1 = \frac{0,5 + \xi_1}{\zeta_1}; \quad \Psi_2 = \frac{0,5 + \xi_2}{\zeta_2};$$

$$\bar{T} = e^{\zeta_3} + 2b \left( \Psi_1 - \Psi_2 e^{\zeta_3} \right). \quad (41)$$

Решение в квадратурах получается и в случае малого нагрева газа на участке с канавками, когда допустимо использовать разложение типа [9]

$$\bar{T}^n \approx 1 + n \left( \bar{T} - 1 \right). \quad (42)$$

Тогда

$$\bar{T} = e^{-F} \left[ 1 + C_1 \int_1^x (\Omega_1 E_1 x (1-n) + D_1) e^F dx \right], \quad (43)$$

где

$$F = C_1 \int_1^x (D_1 - n \Omega_1 E_1 x) dx.$$

Таким образом, из полученных результатов следует, что решение для температуры не зависит от решения для давления.

### Расчет давлений на участке с канавками

Основные выводы и порядок расчета давлений на участке с канавками отображены в работах [1, 5, 10]. Мы здесь рассмотрим только решение системы уравнений для определения давлений. Система уравнений выглядит так:

$$f(s, \tilde{p}_I) = s - \tilde{p}_I - (s-1) \exp \left( \frac{1 - \tilde{p}_I + \tilde{\Lambda}^*}{s} \right);$$

$$g(s, \tilde{p}_I) = \tilde{p}_I - \frac{s}{\eta} - \left( 1 - \frac{s}{\eta} \right) \exp \left( \frac{1 - \tilde{p}_I + \tilde{\Lambda}^{**}}{s} \eta \right). \quad (44)$$

Здесь  $s$  — произвольная функция, подлежащая определению на основании граничных условий задачи;  $\tilde{p}_I = \frac{\bar{p}_I}{\bar{p}_0}$  — относительное давление на

границе межканавочного промежутка и канавки в окружном направлении, подлежащее определению;  $\tilde{\Lambda}^* = \frac{\Lambda_{1L} \bar{\mu} x \beta_1}{\bar{p}_0}$ ,  $\tilde{\Lambda}^{**} = \frac{\Lambda_{1L} \bar{\mu} x (1 - \beta_1)}{\bar{p}_0 \eta^2}$ ;

$\bar{p}_0 = \frac{p_0}{p_1}$  — давление, отнесенное к начальному давлению перед уплотнением  $p_1$ , где  $p_0$  — давление на границе канавки при  $\Theta = \Theta_0$ ; аналогично  $\bar{p}_I = \frac{p_I}{p_1}$ , где  $p_I$  — давление на границе межканавочного промежутка при  $\Theta = \Theta_I$ .

Функции  $f(s, \tilde{p}_I)$  и  $g(s, \tilde{p}_I)$  разлагаются в ряд Тейлора с точностью до линейных членов



разложения  $\Delta s = s - s(0)$  и  $\Delta \tilde{p}_I = \tilde{p}_I - \tilde{p}_I(0)$  при разложении около точки  $s(0)$ ,  $\tilde{p}_I(0)$ :

$$f(s, \tilde{p}_I) = f(s(0), \tilde{p}_I(0)) +$$

$$+ \frac{\partial f}{\partial s} \bigg|_{\substack{s=s(0) \\ \tilde{p}_I=\tilde{p}_I(0)}} \Delta s + \frac{\partial f}{\partial \tilde{p}_I} \bigg|_{\substack{s=s(0) \\ \tilde{p}_I=\tilde{p}_I(0)}} \Delta \tilde{p}_I + \dots = 0;$$

$$g(s, \tilde{p}_I) = g(s(0), \tilde{p}_I(0)) +$$

$$+ \frac{\partial g}{\partial s} \bigg|_{\substack{s=s(0) \\ \tilde{p}_I=\tilde{p}_I(0)}} \Delta s + \frac{\partial g}{\partial \tilde{p}_I} \bigg|_{\substack{s=s(0) \\ \tilde{p}_I=\tilde{p}_I(0)}} \Delta \tilde{p}_I + \dots = 0.$$

Эта система служит для определения  $\Delta s$  и  $\Delta \tilde{p}_I$ . Решение системы двух линейных уравнений приводит к формулам

$$\Delta s = \frac{-f(s(0), \tilde{p}_I(0)) \frac{\partial g}{\partial \tilde{p}_I} \bigg|_{\substack{s=s(0) \\ \tilde{p}_I=\tilde{p}_I(0)}} + g(s(0), \tilde{p}_I(0)) \frac{\partial f}{\partial \tilde{p}_I} \bigg|_{\substack{s=s(0) \\ \tilde{p}_I=\tilde{p}_I(0)}}}{\frac{\partial f}{\partial s} \bigg|_{\substack{s=s(0) \\ \tilde{p}_I=\tilde{p}_I(0)}} \frac{\partial g}{\partial \tilde{p}_I} \bigg|_{\substack{s=s(0) \\ \tilde{p}_I=\tilde{p}_I(0)}} - \frac{\partial f}{\partial \tilde{p}_I} \bigg|_{\substack{s=s(0) \\ \tilde{p}_I=\tilde{p}_I(0)}} \frac{\partial g}{\partial s} \bigg|_{\substack{s=s(0) \\ \tilde{p}_I=\tilde{p}_I(0)}}};$$

$$\Delta \tilde{p}_I = \frac{f(s(0), \tilde{p}_I(0)) \frac{\partial g}{\partial s} \bigg|_{\substack{s=s(0) \\ \tilde{p}_I=\tilde{p}_I(0)}} - g(s(0), \tilde{p}_I(0)) \frac{\partial f}{\partial s} \bigg|_{\substack{s=s(0) \\ \tilde{p}_I=\tilde{p}_I(0)}}}{\frac{\partial f}{\partial s} \bigg|_{\substack{s=s(0) \\ \tilde{p}_I=\tilde{p}_I(0)}} \frac{\partial g}{\partial \tilde{p}_I} \bigg|_{\substack{s=s(0) \\ \tilde{p}_I=\tilde{p}_I(0)}} - \frac{\partial f}{\partial \tilde{p}_I} \bigg|_{\substack{s=s(0) \\ \tilde{p}_I=\tilde{p}_I(0)}} \frac{\partial g}{\partial s} \bigg|_{\substack{s=s(0) \\ \tilde{p}_I=\tilde{p}_I(0)}}}. \quad (45)$$

Система решается методом последовательных приближений. Значения функции  $f(s(0), \tilde{p}_I(0))$  и  $g(s(0), \tilde{p}_I(0))$  вычисляются по формулам (44). Производные подсчитываются по формулам

$$\frac{\partial f}{\partial s} = 1 + \left( \frac{s-1}{s} \frac{1-\tilde{p}_I + \tilde{\Lambda}^*}{s} - 1 \right) \exp \left( \frac{1-\tilde{p}_I + \tilde{\Lambda}^*}{s} \right);$$

$$\frac{\partial f}{\partial \tilde{p}_I} = 1 + \frac{s-1}{s} \exp \left( \frac{1-\tilde{p}_I + \tilde{\Lambda}^*}{s} \right) - 1;$$

$$\frac{\partial g}{\partial s} = \left[ \left( 1 + \frac{1-\tilde{s}/\eta}{s} \eta \frac{1-\tilde{p}_I + \tilde{\Lambda}^{**}}{s} \eta \right) \times \right. \\ \left. \times \exp \left( \frac{1-\tilde{p}_I + \tilde{\Lambda}^{**}}{s} \eta \right) - 1 \right] \frac{1}{\eta};$$

$$\frac{\partial g}{\partial \tilde{p}_I} = 1 + \frac{1-\tilde{s}/\eta}{s} \exp \left( \frac{1-\tilde{p}_I + \tilde{\Lambda}^{**}}{s} \eta \right). \quad (46)$$

В результате вычисления системы уравнений получаем значения  $s$  и  $\tilde{p}_I$ , которые необходимы для определения интегралов типа

$$J^* = \frac{s-1}{\tilde{p}_I - 1} + \frac{\tilde{p}_I + 1}{2\tilde{\Lambda}^*};$$

$$J^{**} = \frac{\tilde{p}_I + 1}{2\tilde{\Lambda}^{**}} - \frac{1-\tilde{s}/\eta}{\tilde{p}_I - 1}. \quad (47)$$

После определения интегралов вычисляем функцию типа

$$\Phi(x) = \beta_1 + \eta^3 (1-\beta_1) +$$

$$+ (\tilde{p}_I - 1) \left[ \beta_1 J^* + \eta^3 (1-\beta_1) J^{**} \right] +$$

$$+ (\tilde{p}_I - 1)^2 \left[ \frac{\beta_1 J^*}{2 - J^*} + \frac{2\eta^3 (1-\beta_1) J^{**2}}{1 + J^{**}} \right]. \quad (48)$$

Решение однородного дифференциального уравнения, полученное путем сращивания решений двух уравнений при  $\Theta - \Theta_0 = \beta_1$  на границе межканавочного промежутка и канавки выглядит таким образом:

$$Y(x) = \exp(-F) \left[ Y(1) + \int_1^x g(x) \exp(F) dx \right], \quad (49)$$

где

$$F = \int_1^x f(x) dx;$$

$$f(x) = (\eta^3 - 1) \frac{\left( \tilde{p}_I^2 \frac{d\Theta_1}{dx} - \frac{d\Theta_0}{dx} \right)}{\Phi(x)};$$

$$g(x) = -\frac{4\bar{G}\Lambda_1 \bar{\mu} \bar{T}}{x};$$

$$Y(x) = \bar{p}_0^2 \Phi(x);$$

$$\bar{G} = \frac{M_1 (\beta_1 + \eta (1-\beta_1))}{M_{\text{ol}}}$$

— безразмерные протечки газа через уплотнение. Для спиральных канавок с постоянной



угловой шириной  $\frac{d\Theta_1}{dx} = \frac{d\Theta_0}{dx}$ , соответственно  $\frac{d\Theta_0}{dx} = \frac{n_k \operatorname{ctg}\gamma}{4\pi} \frac{1}{x}$ . Тогда

$$f(x) = (\eta^3 - 1) \frac{(\tilde{p}_1^2 - 1)}{\Phi(x)} \frac{n_k \operatorname{ctg}\gamma}{4\pi} \frac{1}{x}.$$

Интеграл типа  $F = \int_1^x f(x)dx$  вычисляется численным интегрированием. Вычисление уравнения (49) производится методом последовательного приближения.

### Расчет СГУ с трапециевидными канавками

На рис. 3 показана трапециевидная форма канавок СГУ фирмы «Джон Крейн».

Канавочный участок имеет два яруса канавок с криволинейными боковыми границами, которые очерчены отрезками логарифмической спирали. При переменном параметре  $\beta$ , зависящем от  $r$  в пределах каждого яруса канавок, для вычисления температур  $T$  в щели приходится использовать численное интегрирование, так же и при определении давлений.

Термодинамические параметры газа перед уплотнением, безразмерные коэффициенты и критерии подобия определяются таким же способом, как рассмотрено выше, но, в отличие от расчета СГУ со спиральными канавками, здесь приходится учитывать переменность значения  $\beta$ . В уравнение для температуры (43) входят без-

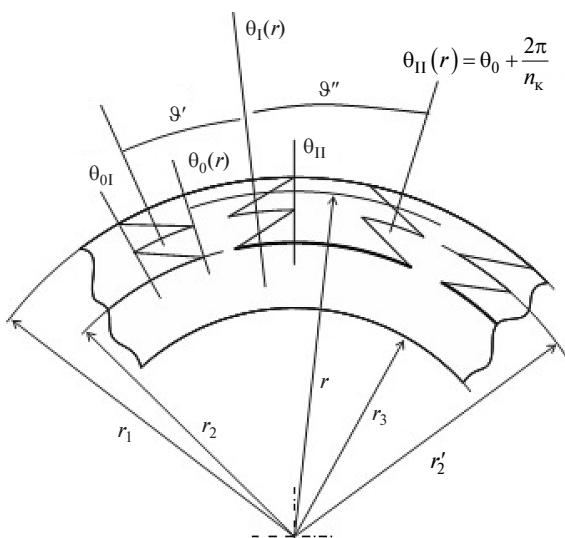


Рис. 3. Схема СГУ с трапециевидными канавками

размерные коэффициенты, которые в свою очередь зависят от переменного значения  $\beta$ .

Если боковые границы очерчены отрезками логарифмических спиралей с углами наклона  $\gamma_0$  и  $\gamma_1 = \pi - \gamma_0$ , то уравнения этих границ в пределах каждого яруса могут быть записаны в следующем виде:

$$\Theta_0(r) = -\operatorname{ctg}\gamma_1 \ln \bar{r} + \Theta_{01};$$

$$\Theta_1(r) = -\operatorname{ctg}\gamma_1 \ln \bar{r} + \Theta_{11}.$$

Угловая протяженность межканавочных промежутков равна

$$\Theta_1 = \Theta_1 - \Theta_0 = 2\operatorname{ctg}\gamma_1 \ln \bar{r} + \Theta_{11} - \Theta_{01}.$$

Относительная угловая ширина этих промежутков:

$$\beta(r) = \beta_1 + \frac{n_k}{\pi} \operatorname{ctg}\gamma_1 \ln \bar{r}.$$

Относительная угловая ширина межканавочного промежутка и канавок в первом ярусе:

$$\beta_1 = (\Theta_{11} - \Theta_{01}) \frac{n_k}{2\pi};$$

$$1 - \beta_1 = 1 - \beta_1 + \frac{n_k}{\pi} \operatorname{ctg}\gamma_1 \ln \bar{r}.$$

Относительная угловая ширина межканавочного промежутка при входе в второй ярус:

$$\beta_2 = \beta_1 + \frac{n_k}{\pi} \operatorname{ctg}\gamma_1 \ln \bar{r}_2',$$

$$\text{причем } \bar{r}_2' = \frac{r_2'}{r_1}.$$

Для определения давления на участке с канавками используется формула (49), но при этом значение  $\frac{d\Theta_0}{dx}$  будет выглядеть таким образом:

$$\frac{d\Theta_0}{dx} = -\frac{d\Theta_1}{dx},$$

соответственно

$$\frac{d\Theta_0}{dx} = \frac{n_k \operatorname{ctg}\gamma}{4\pi} \frac{1}{x},$$

где  $x = (r/r_1)^2$ .

Дальнейший расчет ведется таким же образом, как расчет давлений СТГУ со спиральными канавками.



В изложенном методе расчета температур и давлений в щелях канавочного участка СГУ для вышеуказанных форм канавок используется постоянная глубина канавок  $\Delta h = \text{const}$ . Более сложным является случай, когда глубина канавок  $\Delta h$  оказывается переменной.

Таким образом, в результате последовательных расчетов уравнений для определения давлений можно построить зависимость распределения давления на участке с канавками.

### Бесканавочный участок

Течение газа на бесканавочном участке — осесимметричное, стационарное как в относительном, так и в абсолютном движении. Однако скорости могут быть соизмеримы со звуковой скоростью газа. На этом участке происходит падение давления до выходного значения  $p_3$ , которое связано с атмосферным давлением, так как после I-й ступени СГУ утечка выводится на «свечу», в случае достижения скоростью газа звуковой скорости наступает «критический» режим истечения газа при  $M_{3\text{кр}} \approx 1$ . Основные уравнения, описывающие течение газа на бесканавочном участке, а также их вывод даны в работах [1, 2, 10].

Как и в случае расчета на участке с канавками по уже известным значениям температуры  $T_2$  и давления  $p_2$ , на конце участка можно рассчитать термодинамические и безразмерные параметры газа на входе в бесканавочный участок. Значение относительной угловой протяженности  $\beta_2 = 1$ , поэтому формулы, в которые входят значения  $\beta$ , упрощаются.

Система дифференциальных уравнений, описывающих течение на бесканавочном участке:

$$\frac{dM(x)^2}{dx} = M(x)^2 \frac{f_2(1+1,2k_2M(x)^2) + f_1(1+\chi_2M(x)^2)}{1-(1,2k_2-2\chi_2)M(x)^2},$$

$$\frac{d\bar{T}}{dx} = \bar{T} \frac{f_2(1-1,2k_2M(x)^2) + f_1\chi_2M(x)^2}{1-(1,2k_2-2\chi_2)M(x)^2}, \quad (50)$$

где  $M(x)$  — безразмерная радиальная скорость, которая подлежит определению;  $\bar{T} = \frac{T}{T_2}$  — зна-

чение безразмерной температуры, относящееся к температуре  $T_2$  на конце участка с канавками; значения  $x$  теперь относятся к радиусу  $r_2$ , т. е.  $x = r/r_2$ ;  $k_2$  — показатель адиабаты газа перед бесканавочным участком;  $\chi_2 = \frac{27}{35}(k_2-1)$ ;

$$f_1 = \left( 3,6k_2M(x)^2C_2x\bar{T}^n - \right.$$

$$\left. -1 - \frac{9}{20} \frac{k_2}{k_2-1} \frac{\Omega_2 x}{\bar{T}} \right) \frac{1}{x};$$

$$f_2 = \frac{\Omega_2 \left( C_2x\bar{T}^n - 1 \right) - C_2D_2(\bar{T} - \bar{T}_{\text{oc}})}{\bar{T}},$$

где  $\bar{T}_{\text{oc}} = T_{\text{oc}}/T_2$  — относительная температура среды, окружающей вращающееся кольцо.

Решение системы уравнений (50) выполняется с помощью метода Рунге — Кутты четвертого порядка для систем дифференциальных уравнений.

В результате решения системы дифференциальных уравнений получаем значения безразмерной радиальной скорости на выходе из уплотнения  $M(x_3)$ , или  $M_3$ , а также температуру  $T_3$  и давление  $p_3$ . Необходимо отметить, что температура газа после выхода потока из уплотнения определяется полной температурой

$$T_3^* = T_3 \left( 1 + \chi_2 M_3^2 \right) + \Omega_2 x_3.$$

Величина  $|M_1|$  связана с приведенными массовыми протечками через уплотнение  $V_{\text{пп}}$ , отнесенными к плотности газа при «нормальных условиях» (давление 1 бар и температура 273 K), соотношением

$$V_{\text{пп}} = 1,2\pi r_1 H \left[ \beta_1 + \eta(1-\beta_1) \right] \times$$

$$\times p_1 |M_1| \frac{273}{Z_1 T_1} \sqrt{k_1 Z_1 R T_1}. \quad (51)$$

На рис. 4 представлены расчетные значения протечек и коэффициента распорной силы для двух рассматриваемых типов канавок СГУ.

Из рис. 4 видно, что протечки  $V$  через СГУ со спиральными (нереверсивными) канавками превышают протечки СГУ с трапециевидными

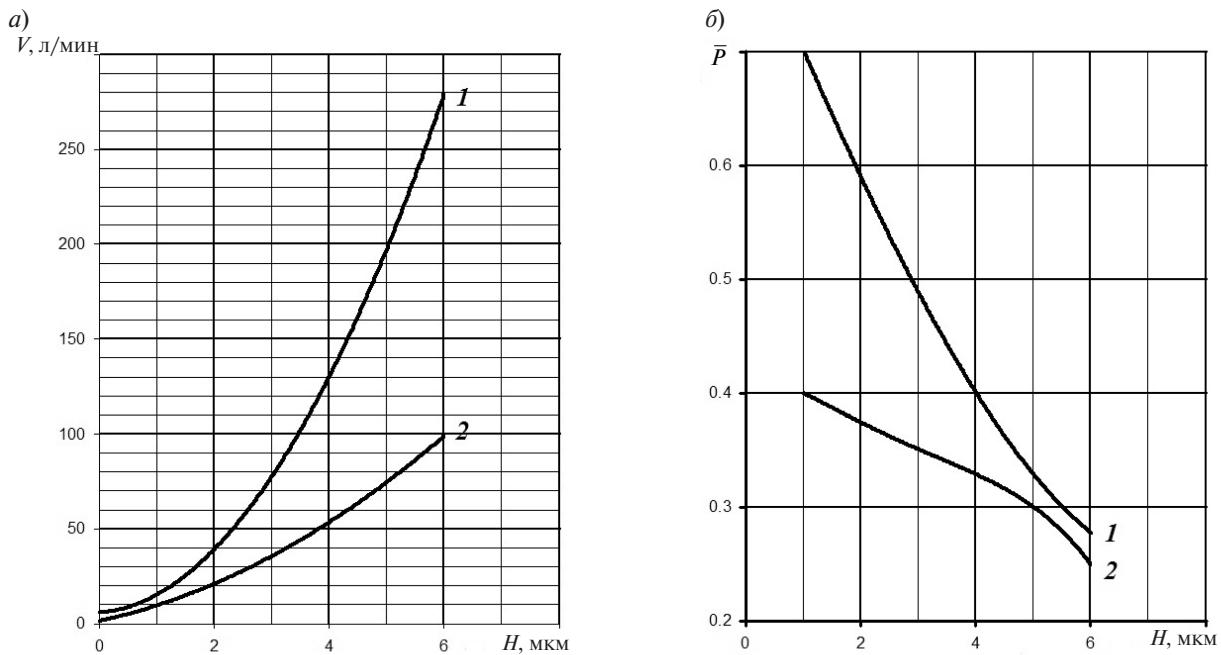


Рис. 4. Характеристики уплотнений

( $a$  — протечки;  $\bar{P}$  — коэффициент распорной силы) для спиральных (1) и трапециевидных (2) канавок

(реверсивными) канавками, однако распорная сила  $P$  при этом оказывается несколько больше, чем при трапециевидных канавках. Следовательно, при выборе типов СГУ необходимо учитывать режимы работы центробежных компрессоров, когда в момент пуска (при малых оборотах вращения ротора) происходит повышенный износ в «парах» трения.

Таким образом, производителям центробежного компрессора целесообразно проводить газодинамические расчеты СГУ с различными типами канавок для определения протечек и распорной силы. Затем по расчетам подбирать упругие элементы СГУ (пружины, уплотнительные полимерные кольца), чтобы предотвратить повышенный износ поверхностей пар трения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ден, Г.Н.** Термогазодинамика сухих торцевых газовых уплотнений роторов турбомашин [Текст]: Монография / Г.Н. Ден.— Владивосток: Изд-во Дальрыбвтуз, 2003.
2. **Рид, Р.** Свойства газов и жидкостей [Текст]: Справочное пособие / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд.— Л.: Химия, 1982.
3. **Бухарин, Н.Н.** Моделирование характеристик центробежных компрессоров [Текст]/Н. Н. Бухарин.— Л.: Машиностроение, 1983.
4. **Ден, Г.Н.** Введение в термогазодинамику реальных газов [Текст]: Монография / Г.Н. Ден.— СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998.— 142 с.
5. **Ден, Г.Н.** К расчету давлений на канавочном участке сухого торцевого газового уплотнения ротора турбомашины [Текст]/ Г.Н. Ден, А.Е. Перескоков // Компрессорная техника и пневматика.— СПб.: АСКОМП, 1998.— Вып. № 18–19.— С. 50–55.
6. **Кутателадзе, С.С.** Теплопередача и гидродинамическое сопротивление [Текст]: Справочное пособие / С.С. Кутателадзе.— М.: Энергоатомиздат, 1990.
7. **Дорфман, Л.А.** Гидродинамическое сопротивление и теплоотдача вращающихся тел [Текст] / Л.А. Дорфман.— М.: Гос. изд. физ-мат. литературы, 1960.
8. Справочник по специальным функциям [Текст] / Под ред. М. Абрамовица и Н. Сиган.— М.: Наука, 1979.— С. 125–140.
9. **Камке, Э.** Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям [Текст]/Э. Камке.— М.: Иностранный литература, 1951.
10. **Юн, В.К.** Теория и расчет сухих торцевых газовых канавочных уплотнений валов холодильных турбокомпрессоров [Текст]: Дис ... канд. техн. наук / В.К. Юн.— СПб., 2002.



УДК 621.9

В.И. Новиков, С.Л. Мурашкин, А.И. Фоломкин

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКИ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ

Эффективность изготовления конкурентоспособной по основным показателям надежности и долговечности деталей турбин в настоящее время может обеспечиваться за счет постоянного совершенствования технологии обработки заготовок, в том числе технологии финишной обработки.

Технологическая подготовка производства таких сложных и оригинальных деталей турбин, как лопатка, основана на технологии, в значительной степени отличающейся от последовательности изготовления других деталей машин [1]. Особенностями всех турбинных лопаток при весьма большом количестве их разновидностей являются сложность геометрии как рабочей части, так и хвоста лопатки, а также низкая жесткость рабочей части. Кроме того, для обеспечения надежности, долговечности, ремонтопригодности и других эксплуатационных свойств турбины к конструкциям лопаток и к состоянию их поверхности предъявляют жесткие технические требования. Шероховатость поверхностей рабочей части и переходных галтелей обычно задается в пределах  $Ra = 1,25 - 0,32$  мкм, а шероховатость профильных поверхностей хвостов лопаток —  $Ra = 1,25 - 0,63$  мкм.

В технологическом процессе изготовления лопаток широко используются сложные средства технологического оснащения, включающие станки, режущий инструмент, измерительные приборы и т.д., которые должны обеспечить предъявляемые к изделию технические требования.

Высокая точность и качество поверхностного слоя лопаток обеспечиваются на чистовых и финишных операциях технологического процесса. В связи с этим в цикле подготовки производства этим операциям отводится значительная часть времени. После фрезерования поверхности рабочей части лопаток шлифуют, время обработки одной лопатки может достигать нескольких часов. Шлифование может выполняться двумя спосо-

бами: протяжкой бесконечной ленты между копиром и обрабатываемой поверхностью, а также обкатыванием шлифовального круга по обрабатываемой поверхности.

Известно, что в поверхностном слое после шлифования можно выделить как бы три слоя [2, 3]: граничный — толщиной 2–3 Å, состоящий из адсорбированной пленки газа; второй, представляющий собой рыхлый деформированный слой толщиной 80 Å, состоящий из окислов, нитридов и металла, обезуглероженного действием высоких температур, развивающихся при шлифовании; третий слой толщиной около 5 мкм, который состоит из деформированного и подвергнутого нагреву металла. Кроме того, высокие мгновенные температуры, развивающиеся при шлифовании стали, могут привести к появлению прижогов и трещин.

Для дальнейшего снижения шероховатости поверхности и уменьшения толщины дефектного слоя сложнопрофильных поверхностей лопаток существует целый ряд различных методов обработки, в том числе электрохимическое, химическое, механическое полирования, однако процесс получения заданной шероховатости поверхности — трудоемкий, дорогостоящий, а зачастую затруднительный, особенно при использовании экологически чистых методов обработки материалов.

В силу сложной геометрии лопаток турбин и их невысокой жесткости полирование механическими методами требует специального технологического оборудования и инструмента или же выполняется слесарными методами, что приводит к значительному увеличению себестоимости изделия. Кроме того, при проектировании механической полировальной операции необходимо учитывать, что лопатки турбин имеют невысокую жесткость, и точность обработки в значительной степени будет зависеть от наличия применяемых приспособлений, режимов полирования и инструмента. Проведенные ав-



торами исследования показали, что перемещения при механическом полировании в зависимости от конструкции лопатки могут составлять 100 мкм и более, что отрицательно может сказать на качестве готового изделия.

Для абразивно-жидкостного полирования характерна малая производительность и небольшая толщина снимаемого припуска. Этот метод используется главным образом для глянцевания рабочих поверхностей лопаток. Оно выполняется в камере, через форсунку которой на полируемую поверхность подается воздушная смесь жидкости с абразивными зернами.

Для магнитно-абразивного полирования используются порошки, обладающие абразивными и ферромагнитными свойствами, стойкость которых ограничена. Качество получаемой поверхности в этом случае зависит от качества и размеров абразивных зерен. Кроме того, при магнитно-абразивной обработке требуется организация взаимного перемещения заготовки и абразивных зерен, сложность чего зависит от геометрии обрабатываемой поверхности.

При электрохимическом полировании происходит направленный съем металла с поверхности лопатки, которая служит анодом, и это сопровождается копированием поверхностей катода. Для данного процесса требуется создание электрода-инструмента, повторяющего профиль обрабатываемой детали. Кроме того, это экологически неблагоприятный метод, ибо происходит с применением токсичных электролитов.

Один из путей совершенствования технологического процесса изготовления турбинных лопаток — применение такого современного метода, как электролитно-плазменное полирование. По сравнению с вышеописанными методами электролитно-плазменное полирование (ЭПП) — высокоеффективный процесс обработки изделий из токопроводящих материалов в нетоксичных средах, имеющий более высокие экологические и экономические показатели. Наиболее близко к ЭПП по получаемым параметрам качества обрабатываемой поверхности и технологическому оснащению электрохимическое полирование, но, в отличие от него, в электролитно-плазменной технологии используются экологически безопасные водные соле-

вые растворы, которые в несколько раз дешевле токсичных кислотных компонентов.

Сущность электролитно-плазменного полирования заключается в том, что при пропускании через водный раствор электролита электрического тока у одного из электродов происходит интенсивное парообразование. Образующиеся пузыри экранируют электрод, формируя газовую анодную оболочку, уменьшая площадь соприкосновения электрода с электролитом, повышается плотность тока вплоть до полного разрыва электрохимического контакта между электролитом и электродом. При этом прохождение тока через газовый промежуток 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 не нагревается выше температуры электролита, а с его поверхности удаляется слой материала.

На основании многолетних экспериментов по калориметрированию тепловых потоков из газовой анодной оболочки в анод-заготовку и электролит, а также проведенных расчетов теплового баланса процесса ЭПП построена конечно-элементная модель распределения теплового поля при воздействии разряда на поверхность заготовки. Для чего была рассчитана мощность одного разряда, воздействующего на вершину гребешков шероховатости обработанной поверхности. Энергию разряда можно определить из уравнения баланса энергии:

$$W_{\text{разр}} = w_{\text{разр}} S = (w_{\text{ГАО}} - q_{\text{ГАО-ан}} - q_{\text{ГАО-жид}}) S, \quad (1)$$

где  $w_{\text{разр}}$  — плотность энергии разряда, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{\text{ГАО-ан}}$  — плотность теплового потока в заготовку-анод (данная величина определена экспериментально в процессе калориметрирования и составляет 38000 Вт/м<sup>2</sup>);  $q_{\text{ГАО-жид}}$  — плотность теплового потока в электролит, Вт/м<sup>2</sup>;  $w_{\text{ГАО}}$  — плотность энергии в газовой анодной оболочке, Вт/м<sup>2</sup>;  $S$  — обрабатываемая площадь, м<sup>2</sup>.

При электролитно-плазменном полировании газовую анодную оболочку можно рассматривать как пленочное кипение жидкости на



поверхности металлического анода. Плотность теплового потока при пленочном кипении можно оценить по формуле

$$q_{\text{ГАО-жид}} = \alpha(t_{\text{п}} - t_{\text{ж}}), \quad (2)$$

где  $t_{\text{п}}$  — температура газовой анодной оболочки, °C;  $t_{\text{ж}}$  — температура жидкости, °C;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup> °C).

Исходя из теплового равновесия между анодом и оболочкой температура газовой анодной оболочки принимается равной температуре анода. В проведенном эксперименте температура анода составила 112 °C, температура электролита — 95 °C. Коэффициент  $\alpha$  находится из выражения

$$\alpha = \text{Nu} \lambda_{\text{ж}} / X \quad (3)$$

где  $\text{Nu}$  — число Нуссельта;  $X$  — характеристическая длина анода, м;  $\lambda_{\text{ж}}$  — коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м· °C);

$$\text{Nu} = 0,25 \left( x^3 \rho_{\text{пар}} (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{пар}}) q C_{\text{пар}} \right) / \mu_{\text{пар}} \lambda_{\text{пар}}, \quad (4)$$

где  $\rho_{\text{пар}} = 0,5863$  — плотность пара, кг/м<sup>3</sup>;  $g = 9,8$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\rho_{\text{ж}} = 970,5$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $C_{\text{пар}} = 2060$  — удельная теплоемкость пара, Дж/(кг °C);  $\mu_{\text{пар}} = 1,27 \cdot 10^{-5}$  — динамическая вязкость пара, Н·с/м<sup>2</sup>;  $\lambda_{\text{пар}} = 0,0246$  — коэффициент теплопроводности пара, Вт/(м °C).

Плотность энергии в парогазовой оболочке равна

$$W_{\text{ГАО}} = W_{\text{ГАО}} / S = R_{\text{ГАО}} I^2 / S, \quad (5)$$

где  $R_{\text{ГАО}}$  — сопротивление газовой анодной оболочки, Ом;  $I$  — сила тока, А.

Тогда с учетом (2)–(5) выражение (1) дает значение  $W_{\text{разряд}} = 227$  Вт.

Основываясь на профилограмме поверхности до полирования, создали конечно-элементную модель обрабатываемой поверхности размером 0,1×0,8 мм, в самой верхней точке которой приложена рассчитанная мощность разряда. Размер конечно-элементной сетки изменяется от 0,01 мм в основании до 0,00005 мм на профиле шероховатости.

Распределение температуры в поверхности (рис. 1), полученное с помощью программы конечно-элементного моделирования ANSYS 11, показало, что температура в поверхности изменяется от 3100 до 92 °C, т. е. за время 10<sup>-6</sup>–10<sup>-4</sup> с существуют три температурные зоны: выше 2800 °C — испарение; от 2800–1400 °C — жидккая фаза; ниже 1400 °C — твердое тело. Таким образом, 0,08 мкм — это испаренный металл; 0,4 мкм — расплавленный; 1,42 мкм — отпущененный слой материала, где наблюдается 10 %-е изменение микротвердости полированного материала. Данные модели подтверждаются экспериментальными, полученными на атомно-силовом сканирующем зондовом микроскопе Solver P47-PRO снимками поверхности образца из стали 30ХГСА после ЭПП (обработка произ-

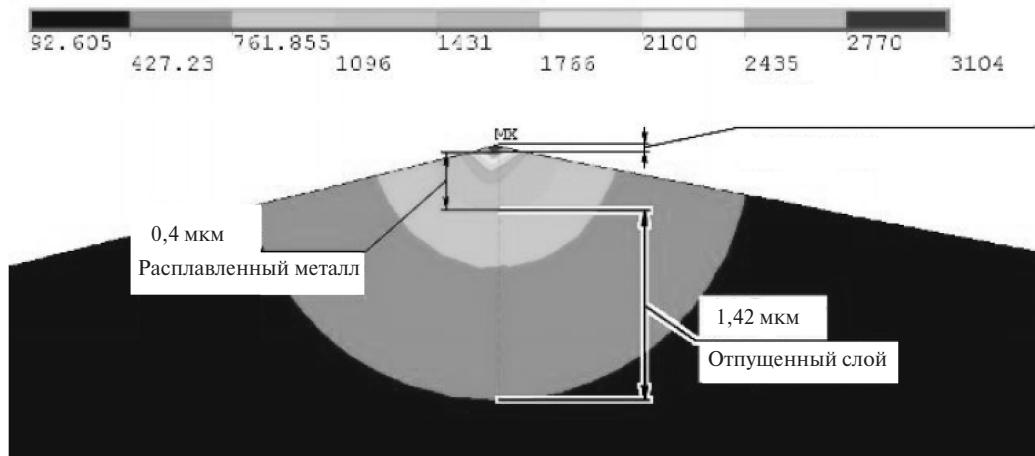


Рис. 1. Распределение теплового поля в обрабатываемой поверхности

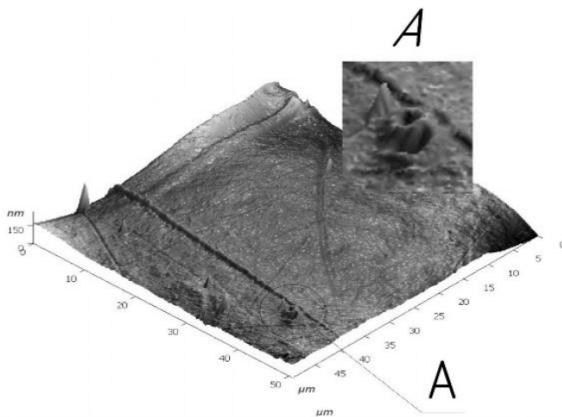


Рис. 2. Топография поверхности пера лопатки после ЭПП

водилась в течение 30 секунд в водном растворе сернокислого натрия концентрацией 0,2 моль/л при напряжении 300 В). На полированной поверхности (рис. 2, выноска А) явно прослеживается наличие лунок диаметром  $\approx 0,6\text{--}0,8$  мкм от

разрядного воздействия. Время, необходимое для достижения шероховатости  $R_a = 0,14$  мкм, рассчитанное по построенной модели, составляет примерно 175 с, а экспериментальное — 190 с, что подтверждает адекватность предлагаемой модели.

Предлагаемая модель теплового поля необходима для проведения технологических расчетов и позволяет оценить величину снимаемого материала и время, необходимое для достижения требуемого уровня шероховатости полируемой поверхности, определить зону температурного влияния, а так же произвести оптимизацию процесса электролитно-плазменного полирования.

Проведенные исследования показали, что применение метода электролитно-плазменного полирования снижает время на обработку таких сложных в производстве изделий, как турбинная лопатка, в два раза при значительном снижении термических и полном отсутствии силовых воздействий на обрабатываемую заготовку.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишов, Г.А. Технология производства турбин [Текст] / Г.А. Шишов, С.Ю. Михаэль, Ю.М. Зубарев, В.И. Катенев.— СПб.: Изд-во СПИМаш, 1998.— 191 с.
2. Маслов, Е.Н. Теория шлифования материалов [Текст] / Е.Н. Маслов.— М.: Машиностроение, 1974.— 320 с.
3. Сипайлов, В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности [Текст] / В.А. Сипайлов.— М.: Машиностроение, 1978.— 168 с.
4. Ушомирская, Л.А. Особенности чистовой обработки турбинных лопаток [Текст] / Л.А. Ушомирская, А.И. Фоломкин, В.И. Новиков // Металлообработка.— 2008. № 4.— С. 19–21.

УДК 519.1: 655.1

Иванов А.В., Ваганов В.В., К.А. Котов

#### ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ ЗАКАЗОВ НА ПОЛИГРАФИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Полиграфическое производство характеризуется большим разнообразием выпускаемой продукции и различными технологиями, применяемыми при ее изготовлении. В издательской и полиграфической отрасли на новом витке развития полиграфии происходят существенные качественные и количественные преобразования. За счет появления и развития

цифровой технологии упрощается набор текста, возрастает скорость обработки текста и изображений, повышается качество изображений, что способствует гибкости и управляемости производственного процесса [1–3]. При управлении этапами реализации полиграфических заказов возникает задача диспетчеризации этих заказов, что в общем случае требует решения оптимиза-



ционных многокритериальных задач большой размерности в реальном масштабе времени. Современный этап эксплуатации таких сложных объектов, как линии полиграфического производства и системы их обеспечения, характеризуется потребностью обеспечить растущие требования к качеству и количеству полиграфической продукции через повышение эффективности управления организационно-техническими системами при растущем объеме заказов в условиях существенного ограничения выделяемых ресурсов производства. В рамках указанного противоречия на первый план выходит проблема разработки и внедрения оптимизирующих технологий в системах контроля, управления, эксплуатации и обслуживания систем полиграфического производства. Вопросы, связанные с построением эффективных методов комбинаторной оптимизации и их использования в процессах управления сложными производственными комплексами для класса экстремальных задач, представляют практический интерес как основные процедуры решения сложных задач, требующих большого объема вычислений или дорогостоящих экспериментов.

### Схема оптимального управления потоками заказов

Рассмотрим процесс производства печатной продукции, представляя его технологическими цепочками на трех стадиях: допечатной подготовки, печатного процесса и послепечатной обработки [4–6]. Допечатная подготовка охватывает этапы работ начиная от идеи оформления, подготовки текстовой информации, изобразительных оригиналов и графики и заканчивая изготовлением готовых печатных форм, которые используются для печати тиража. Печатные процессы рассматриваются как регламентированная последовательность технологических операций, проводимых с использованием технических средств, собственно изготовления печатной продукции и направленных на производство полиграфических изданий. Послепечатная обработка — процесс, в котором для изготовления продукции должно быть осуществлено, как правило, большое количество технологических операций.

Эффективность суммарной технологической цепочки зависит не только от производственной

мощности задействованных машин, на которых производятся технологические операции, но и от вида логистических связей между этими операциями.

В процессе управления технологическими операциями часто встречаются задачи оценивания функциональных возможностей, выбора состава и планирования применения средств, входящих в систему полиграфического производства. Для решения этих задач могут быть использованы различные подходы в зависимости от особенностей и назначения таких систем [7–9].

Рассмотрим парк полиграфического производства в цепочках как систему, целью функционирования которой является выполнение некоторого перечня задач  $A = \{a_1, \dots, a_j, \dots, a_m\}$  на характерном интервале времени  $T$  с директивно заданными временами их завершения  $t_j$ . Одна из важнейших задач в полиграфии — качественно загрузить производственные ресурсы. Эта особенность схем технологии данного вида производства объясняется достаточно длинной цепочкой производственного цикла, в котором может применяться значительное количество различных видов допечатного, печатного и послепечатного оборудования. Поэтому проблема эффективной диспетчеризации производства каждого конкретного заказа — достаточно остра. В состав оптимизируемой по производственному назначению системы входят средства, обладающие различными характеристиками  $X = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}$  и способные выполнять задачи  $a_j$  за определенные интервалы времени  $\tau_{ij}$  в соответствии с матрицами назначений  $B = \{b_{ij}\}$  и времен  $T = \{\tau_{ij}\}$ , где  $b_{ij} = 1$ , если  $j$ -я задача может быть осуществлена  $i$ -м средством и  $b_{ij} = 0$ , если не может. Вариант решения перечня задач — распределение их между средствами в виде матрицы

$$U = \{u_{ij}\} : \sum_{i=1}^n u_{ij} b_{ij} = 1, j \in \overline{1, m}.$$

Каждый из вариантов задействования производственных мощностей в цепочке оценивается по показателю ресурсоемкости и степени выполнения объема задач в виде

$$N(U) = C(X) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m n_{ij} u_{ij},$$

$$P(U) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{P(\tau_{ij}) u_{ij}}{n},$$

где  $u_{ij}$  — ресурсы на выполнение  $i$ -м средством  $j$ -й задачи;  $C(X)$  — затраты ресурсов на поддержание функционирования средств полиграфических линий на заданном интервале времени;  $P(\tau_{ij})$  — вероятность выполнения  $i$ -м средством  $j$ -й задачи за время  $\tau_{ij}$ .

Требуется выбрать состав средств  $X_0$ , обеспечивающий решение определенного перечня типовых задач по ожидаемым результатам их выполнения при предпочтениях  $C(U) \xrightarrow{U \in Z_{\{U\}}} \min$ ,  $P(U) \xrightarrow{U \in Z_{\{U\}}} \min$ .

Решение этой задачи предлагается на основе итерационного построения области вариантов  $\Delta = \{U \in Z_{\{U\}} | R(U) \in G\}$ ,  $R(U) = \langle C(U), P(U) \rangle$  для возможных составов системы средств. Это может быть достигнуто путем нахождения последовательности таких решений с использованием рекурсивных алгоритмов оптимизации. При этом переход от одного ( $l$ -го) варианта решения к другому осуществляется за счет вариации текущего состояния распределения работ в ранжированном списке заказов и выбора среди возможных комбинаций предпочтительного — по заранее заданным критериям, например  $U_{l+1} = \arg \min C(U)$ , где  $D_l = \{U_l = U_l + \Delta U\} = D_l$  — множество возможных вариаций текущего оптимизационного решения.

В результате объединения множеств  $D_l$  и исключения из него доминируемых решений будет образовано искомое множество оптимизационных вариантов.

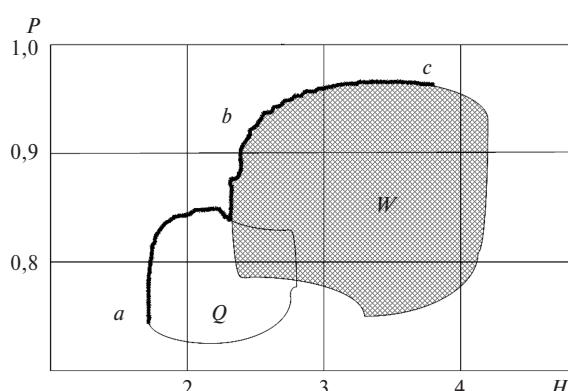


Рис. 1. Область оценок возможных решений для двух составов средств

На рис.1 представлен вид областей оценок решений по организации выполнения двумя составами производственных линий предполагаемого перечня потока заказов, где  $H = \frac{C(U)}{C(X)}$ .

Область  $Q$  соответствует сокращенному составу производственных средств. Искомые решения находятся на линии, обозначенной  $abc$ .

Из рисунка видно, что при сокращении состава используемых производственных средств общие затраты ресурсов на выполнение потока заказов снижаются в основном за счет сокращения затрат  $C(X)$ , но при этом сужается множество возможных решений и падает степень надежности выполнения объема заказов.

Информации, представленной в таком виде, достаточно, чтобы оценить функциональные возможности системы управления потоками заказов с использованием различного состава производственных поточных линий и выбрать предпочтительный вариант их задействований.

Поточные линии — один из самых перспективных видов оборудования. Полиграфические процессы в большинстве своем многооперационны, поэтому их выполнение наиболее эффективно именно на поточных линиях. Поточные линии обеспечивают непрерывность процесса, строгую последовательность проведения всех операций и позволяют максимально сократить или полностью ликвидировать перерывы между ними. Однако поточные линии требуют четкой работы каждой составляющей ее машины или устройства. Перерыв в работе хотя бы одной машины нарушает нормальный ритм процесса.

Предлагается на основе данного подхода разработать прикладные алгоритмы и элементы программного комплекса, которые могут быть использованы в автоматизированных системах управления потоками заказов полиграфических предприятий при планирования производства на достаточно больших интервалах.

Для оптимизации технологической схемы, связанной с ходом выполнения графиков прохождения заказов в производстве, предлагается общая схема рекурсивного комплексирования оптимизационных задач по мере их поступления на некотором интервале времени функционирования производства, которую иллюстрирует рис. 2. Итоговым критерием оптимальности,

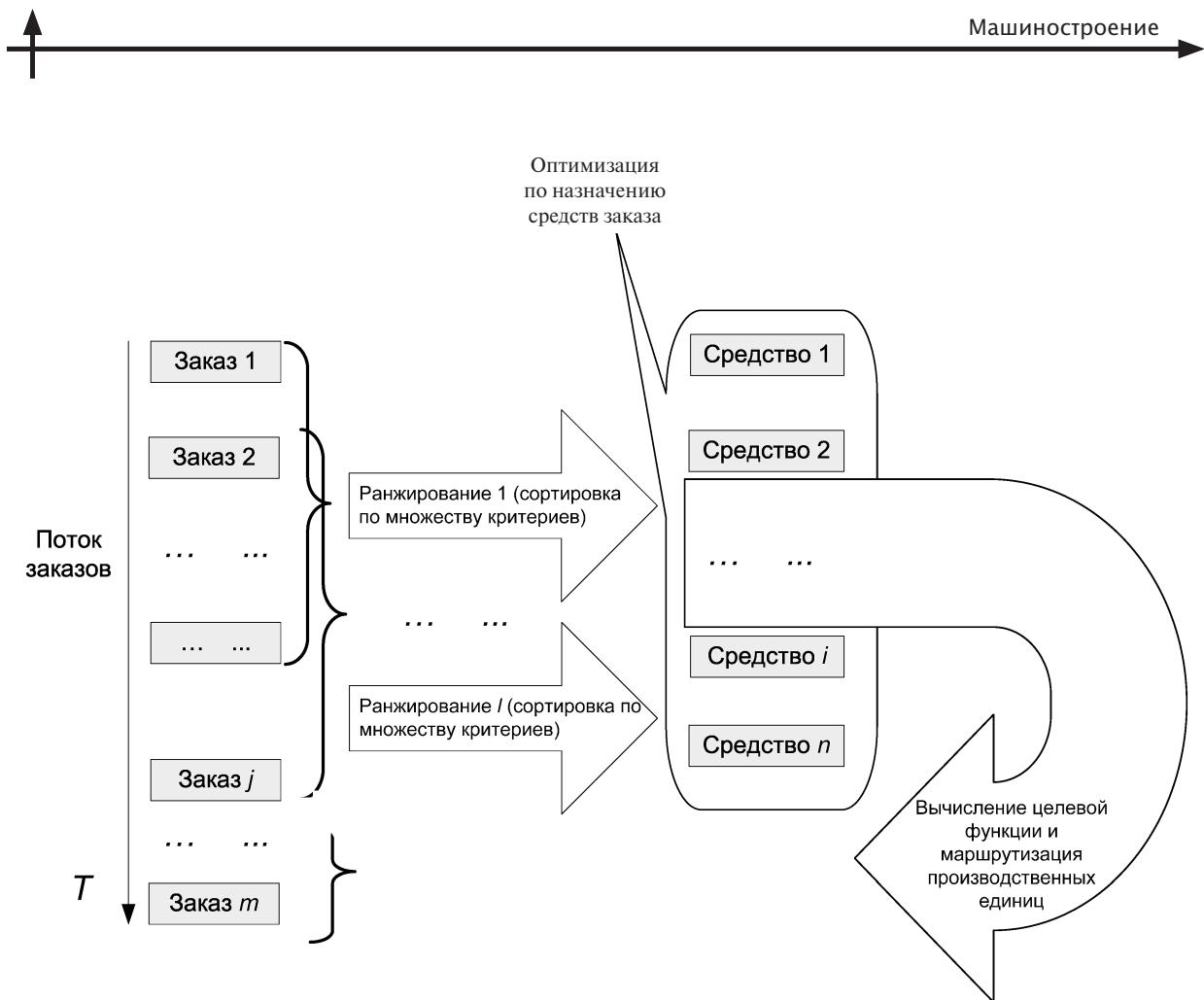


Рис. 2. Общая рекурсивная схема оптимизационных алгоритмов в системе управления потоками заказов

наиболее полно отражающим требование наилучшего использования производственных ресурсов (при обеспечении минимальных сроков реализации заказов), является минимум длительности совокупного производственного цикла изготовления портфеля заказов на заданном интервале времени.

Таким образом, для эффективной реализации системы управления потоками заказов на полиграфическом предприятии необходим комплексный подход, реализующий процесс оптимального динамического использования производительности технологического оборудования, ограниченного перечня заданных материалов и нормативных ограничений по времени реали-

зации полиграфической продукции. При использовании общей схемы оптимального управления потоками заказов полиграфического предприятия оперативно рекурсивно решаются в быстром вычислительном базисе три взаимосвязанные задачи:

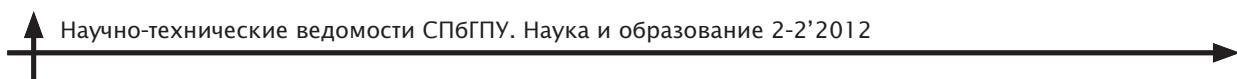
распределение множества заказов по производственным мощностям через решение задачи о назначениях;

ранжирование заказов в потоке по одному или нескольким критериям предпочтения через решение задачи сортировки;

поиск наиболее эффективного производственного маршрута выполнения последовательности заказа или маршрутизация производственных мощностей на множестве заказов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьева, А.Д. Технология полиграфического процесса [Текст] / А.Д. Афанасьева, Г.Б. Сафронова.— М.: МГОУ, 2004.— 45 с.
2. Кондрашова, В.К. Экономика полиграфического предприятия [Текст] / В.К. Кондрашова, О.Г. Исаева.— М.: МГУП, 2000.— 234 с.



3. **Миронова, Г.В.** Организация полиграфического производства [Текст] / Г.В. Миронова.— М.: Изд-во МГУП, 2002.— 352 с.
4. **Волкова, Л.А.** Издательско-полиграфическая техника и технология [Текст] / Л.А. Волкова.— М.: Изд-во МГУП, 1999.— 143 с.
5. Проектирование полиграфического производства. Современные подходы к решению задач проектирования [Текст].— М.: Изд-во МГУП, 2008.— 372 с.
6. **Романо, Ф.** Современные технологии издательско-полиграфической отрасли [Текст] / Ф. Романо.— М.: Принт-медиа центр, 2006.— 454 с.
7. **Чистов, В.В.** Чистов В.В., Волков А.Л. Теория принятия решений [Текст]: Учебное пособие / В.В. Чистов.— М.: Изд-во МГУП, 2002.— 396 с.
8. **Ефимов, М.В.** Теория автоматического управления [Текст] / М.В. Ефимов.— М.: Изд-во МГУП, 2006.— 420 с.
9. **Дорф, Р.** Современные системы управления [Текст] / Р. Дорф, Р. Бишоп.— М.: Изд-во МГУП, 2002.— 396 с.

УДК 621.8

*П.И. Романов, С.В. Викторенкова*

## **РАЗРАБОТКА СБАЛАНСИРОВАННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ ДЛЯ РЕМОНТА ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

В ранее опубликованных работах [1, 2] доказано, что важным фактором, влияющим на надежность лесозаготовительных машин, является технология ее ремонта. Завершающий этап ремонта — сборка. Если обеспечить ее качество, то надежность технологической машины по критериям безотказности и долговечности будет соответствовать уровню, достигнутому на всех предыдущих стадиях ремонта. Установлено, что используемые технологии сборки при ремонте лесозаготовительных машин не обеспечивают качества сборки и нарушают требования безопасности работ. Поэтому предложена новая технология сборки, основанная на применении специально разработанного пневматического сбалансированного манипулятора (СМ) с комбинированной позиционно-астатической системой управления [3]. Особое достоинство пневматических сбалансированных манипуляторов — возможность реализовать позиционный тип управления, при котором обеспечиваются высокая точность и плавность позиционирования, необходимые при выполнении сложных сборочных работ. Однако пневматическим сбалансированным манипулятором с позиционным типом управления свойственны низкие динамические характеристики, значительные усилия управления, трудоемкость настройки системы на определенный вес груза. Поэтому авторами разработана и запатентована струк-

тура устройства управления на основе комбинированного позиционно-астатического способа с автоматическим уравновешиванием веса груза. Предложенная система управления, благодаря автоматической мгновенной настройке на вес объекта манипулирования и малому усилию управления (не более 30 Н), позволяет повысить динамические и точностные характеристики манипулятора до значений, при которых основные характеристики эргатической манипуляционной системы «манипулятор — человек-оператор» (точность позиционирования, максимальная скорость, длительность переходных процессов) определяются возможностями человека-оператора и практически не зависят от массы объекта манипулирования. Устройство управления (см. рисунок) может работать совместно со сбалансированными манипуляторами, построенными по любым кинематическим схемам. Оно включает в себя: силовой пневматический цилиндр 1, к полостям которого подключены выходы редукционных пневматических клапанов 4 и 5 с пропорциональным электрическим управлением; задающее устройство 2; устройство 3 формирования сигналов управления. Задающее устройство состоит из датчика положения 21, рукоятки управления 22 и тормозного механизма 23.

Доказано [1], что предложенная технология ремонта позволяет обеспечить качество сборки лесозаготовительных машин и повысить долго-

вечность, например шарнирных соединений технологического оборудования, до трех раз. Важно отметить, что снятие или установка любого агрегата осуществляются одним оператором, и при этом он прилагает усилие, не превышающее 30 Н.

Технология разработана для ремонта техники в условиях гаражей, ремонтно-механических мастерских и других стационарных объектов ремонтно-обслуживающей базы. В современных условиях во многих случаях экономически выгодно производить ремонт лесных машин на месте возникновения неисправности, агрегатным методом с использованием передвижных ремонтных мастерских [4]. Спецификой ремонта техники в местах эксплуатации на значительной части территории России является высокая вероятность его проведения при отрицательной температуре воздуха.

С учетом сказанного сформулированы задачи исследований:

разработать структуру и конструкцию позиционно-астатической системы управления пневматическим сбалансированным манипуляторам для работы в расширенном температурном диапазоне (до  $-25^{\circ}\text{C}$ );

разработать математическую модель пневматического сбалансированного манипулятора, предназначенного для ремонта машин с использованием передвижных ремонтных мастерских, и вариант его технического решения.

## Методика и результаты экспериментальных исследований

Чтобы проверить возможности использования сбалансированных манипуляторов с комбинированной системой управления для сборки машин при отрицательных температурах, была создана специальная термокамера. Предварительные испытания показали, что при отрицательной температуре воздуха нарушается стабильная работа электропневматических редукционных клапанов 4 и 5 (см. рис. 1), входящих в состав устройства управления. Поэтому предложена специальная структура позиционно-астатического устройства управления для работы в расширенном температурном диапазоне (до  $-25^{\circ}\text{C}$ ) [5]. Поскольку в устройстве управления используется разработанный авторами специальный редукционный клапан, то

потребовалось проведение экспериментальных исследований с целью выбора его оптимальных параметров для работы в диапазоне температур воздуха от  $-25$  до  $+20$   $^{\circ}\text{C}$ . Для проведения эксперимента разработана экспериментальная установка, помещенная в термокамеру.

Оценка запаса устойчивости и быстродействия произведена по кривой переходного процесса при единичном входном воздействии. При решении задачи выбора оптимальных конструктивных параметров специального редукционного клапана в качестве целевой функции выбран минимум функции времени переходного процесса  $t_{\Pi} = f(x_1, \dots, x_i)$ , зависящей от конструктивных параметров устройства  $x_1, \dots, x_i$ . В качестве функции ограничения принята функция перерегулирования  $\sigma = f(x_1, \dots, x_i) = 0$ , а также конструктивные ограничения параметров задающего устройства. Для проведения эксперимента выбраны следующие факторы: диаметр входного дросселя  $d_{\text{вх}}$ , мм; диаметр выходного дросселя  $d_{\text{вых}}$ , мм; диаметр шарика  $d_{\text{ш}}$ , мм; диаметр выходного сопла  $d_{\text{вс}}$ , мм; ход штока  $h_{\text{шт}}$ , мм; жесткость пружины  $k_{\Pi}$ , Н/мм. Цель экспериментальных исследований — получение данных, необходимых для выбора оптимальных

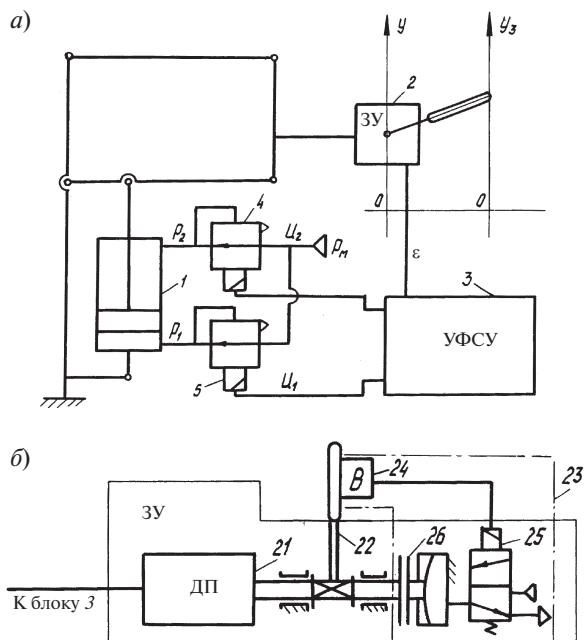


Рис. 1. Принципиальная схема устройства управления СМ с комбинированным управлением (а) и его задающего устройства (б)



конструктивных параметров пневматического редукционного клапана, способного обеспечить работу сбалансированного манипулятора при температуре до  $-25^{\circ}\text{C}$ . Проведены четыре серии экспериментов при температурах:  $-25$ ;  $-10$ ;  $0$ ;  $+20^{\circ}\text{C}$ .

Согласно разработанному центральному композиционному ортогональному плану второго порядка, базирующемуся на дробном факторном эксперименте ( $2^{6-1}$ ), для каждого опыта производилась сборка пневматического редукционного клапана управления с необходимыми сменными элементами. При проведении экспериментов проверка однородности дисперсий проводилась по критерию Фишера, проверка значимости коэффициентов модели — при помощи  $t$ -критерия Стьюдента, а проверка адекватности модели — с использованием  $F$ -критерия Фишера. После получения математических моделей исследуемых параметров осуществлялся переход к их натуральным величинам. Полученные уравнения регрессии использованы при проведении оптимизации.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что при прочих равных условиях повышение температуры воздуха с  $-25$  до  $+20^{\circ}\text{C}$  приводит к повышению быстродействия редукционного клапана (длительность переходного процесса  $t_{\text{п}}$  снижается) и одновременному повышению значения перерегулирования. При этом требуется найти оптимальные параметры специального редукционного клапана, позволяющие обеспечить качество работы устройства управления сбалансированного манипулятора в диапазоне температур от  $-25$  до  $+20^{\circ}\text{C}$ . Поэтому в качестве целевой функции выбрано уравнение регрессии функции времени переходного процесса для температуры воздуха  $-25^{\circ}\text{C}$ . В качестве функции ограничения принимаем уравнение регрессии функции перерегулирования, соответствующее температуре  $+20^{\circ}\text{C}$ , значение которой должно быть равно нулю, так как при  $\sigma > 0$  возможны произвольные колебания рабочего органа сбалансированного манипулятора, что нарушает требования правил безопасности. Вводим также конструктивные ограничения. Таким образом, получена целевая функция

$$t_{\text{п}} = -1,15 + 0,078 d_{\text{вх}} - 0,015 d_{\text{вых}} - 0,045 d_{\text{ш}} + 0,32 d_{\text{вс}} - 0,012 h_{\text{шт}} - 0,057 k_{\text{п}} -$$

$$\begin{aligned} & - 0,00097 d_{\text{вх}} d_{\text{вых}} - 0,0035 d_{\text{вх}} d_{\text{ш}} - \\ & - 0,0035 d_{\text{вх}} d_{\text{вс}} + 0,00073 d_{\text{вх}} k_{\text{п}} + \\ & + 0,00067 d_{\text{вых}} d_{\text{ш}} - 0,0012 d_{\text{вых}} d_{\text{вс}} - \\ & - 0,00012 d_{\text{вых}} h_{\text{шт}} - 0,0014 d_{\text{вых}} k_{\text{п}} + \\ & + 0,0027 d_{\text{ш}} d_{\text{вс}} + 0,00063 d_{\text{ш}} h_{\text{шт}} - \\ & - 0,002 d_{\text{ш}} k_{\text{п}} - 0,00009 d_{\text{вс}} h_{\text{шт}} - \\ & - 0,008 d_{\text{вс}} k_{\text{п}} + 0,00014 h_{\text{шт}} k_{\text{п}} - \\ & - 0,0061 d_{\text{вх}}^2 + 0,0023 d_{\text{вых}}^2 - 0,012 d_{\text{вс}}^2 + \\ & + 0,00005 h_{\text{шт}}^2 + 0,644 k_{\text{п}}^2 \rightarrow \min. \end{aligned}$$

Ограничения:

$$\begin{aligned} \sigma = & 33 - 25 d_{\text{вх}} - 19 d_{\text{вых}} + 7,8 d_{\text{ш}} + 21 d_{\text{вс}} + \\ & + 1,6 h_{\text{шт}} + 10 k_{\text{п}} + 0,15 d_{\text{вх}} d_{\text{вых}} + 0,11 d_{\text{вх}} d_{\text{ш}} + \\ & + 0,12 d_{\text{вх}} d_{\text{вс}} + 0,15 d_{\text{вх}} h_{\text{шт}} + 0,73 d_{\text{вх}} k_{\text{п}} + \\ & + 1,1 d_{\text{вых}} d_{\text{ш}} - 2,1 d_{\text{вых}} d_{\text{вс}} - 0,071 d_{\text{вых}} h_{\text{шт}} + \\ & + 0,26 d_{\text{вых}} k_{\text{п}} - 1,1 d_{\text{ш}} d_{\text{вс}} - 0,062 d_{\text{ш}} h_{\text{шт}} - \\ & - 0,2 d_{\text{ш}} k_{\text{п}} - 0,14 d_{\text{вс}} h_{\text{шт}} + 0,069 d_{\text{вс}} k_{\text{п}} - \\ & - 0,13 h_{\text{шт}} k_{\text{п}} + 0,7 d_{\text{вх}}^2 - 0,042 d_{\text{вых}}^2 + \\ & + 0,073 d_{\text{ш}}^2 - 0,14 d_{\text{вс}}^2 - 0,002 h_{\text{шт}}^2 - 97 k_{\text{п}}^2 = 0; \end{aligned}$$

$$t_{\text{п}} > 0; 1,0 < d_{\text{вх}} < 5,0; 1,0 < d_{\text{вых}} < 5,0; 6,0 < d_{\text{ш}} < 14,0;$$

$$3,0 < d_{\text{вс}} < 7,0; 15,0 < h_{\text{шт}} < 65,0; 0,55 < k_{\text{п}} < 1,10.$$

Задача сводится к нахождению оптимальных  $d_{\text{вх}}$ ,  $d_{\text{вых}}$ ,  $d_{\text{ш}}$ ,  $d_{\text{вс}}$ ,  $h_{\text{шт}}$ ,  $k_{\text{п}}$ , удовлетворяющих конструктивным ограничениям. Задача решена на ЭВМ при помощи пакета MathCAD. В результате получены следующие оптимальные параметры специального редукционного клапана:  $d_{\text{вх}} = 1,62$  мм,  $d_{\text{вых}} = 3,78$  мм,  $d_{\text{ш}} = 8,83$  мм,  $d_{\text{вс}} = 5,60$  мм,  $h_{\text{шт}} = 62,0$  мм,  $k_{\text{п}} = 0,80$  Н/мм.

Для выбора оптимальных или рациональных параметров других элементов пневматического устройства управления сбалансированного манипулятора с комбинированным управлением и параметров пневматического привода необходимо



димо разработать обобщенную математическую модель. При этом наибольшую сложность представляет математическое моделирование процессов в специальном редукционном клапане, так как теоретическое описание динамических процессов, происходящих в дросселе «сопло — заслонка» очень громоздко. Поэтому целесообразно получить его экспериментальную математическую модель.

Эксперимент по построению математической модели специального редукционного клапана проведен в соответствии с методикой, представленной в работе [1]. Методика основана на анализе переходной характеристики исследуемого элемента системы управления. В результате получено дифференциальное уравнение специального клапана

$$T_2^2(d^2p_{\text{вых}}/dt^2) + T_1(dp_{\text{вых}}/dt) + p_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}},$$

где  $T_1$ ,  $T_2$  — постоянные времени;  $k$  — коэффициент;  $p_{\text{вых}}$  — давление на выходе клапана;  $x_{\text{вх}}$  — перемещение штока клапана;  $T_1 = 1,1 \cdot 10^{-2}$  с;  $T_2 = 4,39 \cdot 10^{-3}$  с;  $k = 1,905 \cdot 10^7$  Па/м. При использовании этого уравнения совместно с системой уравнений (5.1)–(5.14), представленной в работе [1], получаем обобщенную математическую модель СМ с пневматическим комбинированным управлением, предназначенного для эксплуатации в расширенном температурном диапазоне (до  $-25$  °С).

Для проверки адекватности разработанной обобщенной математической модели и оценки точностных характеристик манипуляторов в диапазоне температуры воздуха от  $-25$  до  $+20$  °С проведена серия экспериментов. Исследования проводились по методике, разработанной в работе [1] для исследования СМ с комбинированной системой управления. Дополнением методики является то, что все испытания повторяются для температур воздуха  $-25$ ;  $-10$ ;  $0$ ;  $+20$  °С. Поэтому экспериментальная установка, созданная на базе сбалансированного манипулятора МПУ-100 с разработанным устройством управления, располагалась в специальной термокамере.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что погрешность значений установившейся скорости при расчете по обобщенной модели не превышает 7,8; 8,2; 9,2; 9,6 % при температурах воздуха со-

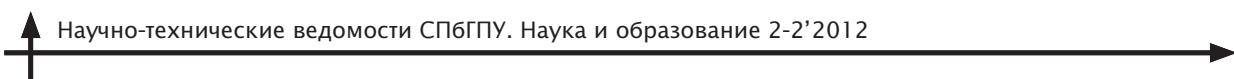
ответственно  $+20$ ;  $0$ ;  $-10$ ;  $-25$  °С. Погрешность расчетных значений времени разгона при данных температурах не превышает соответственно 12,4; 12,9; 14,6; 15,5 %, а погрешность расчетных значений времени торможения соответственно не более 13,5; 13,7; 15,4 и 15,9 %. Таким образом, экспериментальные результаты подтверждают адекватность разработанной обобщенной математической модели. Погрешность позиционирования при работе в позиционном режиме при температуре воздуха  $+20$ ,  $0$ ,  $-10$ ,  $-25$  °С не превышала, соответственно, следующих пределов:  $\pm 0,27$ ;  $\pm 0,28$ ;  $\pm 0,34$ ;  $\pm 0,36$  мм.

**Разработка технического решения  
сбалансированного манипулятора  
для механизации сборки машин  
при ремонте с использованием  
передвижных ремонтных мастерских**

При разработке технического решения учитывалось, что современные передвижные ремонтные мастерские оснащены краном-манипулятором. Поэтому предложено сбалансированный манипулятор выполнить в миниатюрном исполнении и оснастить его устройством быстрого соединения с краном-манипулятором. В этом случае с помощью сбалансированного манипулятора выполняются ориентирующие движения в процессе установки или снятия агрегата, а транспортировка его к месту ремонта или, наоборот, к месту установки обеспечивает кран-манипулятор. Новизна технического решения защищена патентом на изобретение [5]. Изобретение решает задачу расширения технологических возможностей передвижных ремонтных мастерских.

Предложен вариант структуры пневматического устройства управления сбалансированным манипулятором на основе позиционно-астатического управления и автоматического уравновешивания силы тяжести груза для механизации сборки машин при температуре до  $-25$  °С.

Разработаны обобщенные математические модели пневматических сбалансированных манипуляторов с комбинированным управлением, учитывающие процессы, происходящие в устройстве управления и пневматическом приводе. Их можно рекомендовать для анализа и синтеза манипуляторов, построенных по основным кине-



матическим схемам, которые используются в сбалансированных манипуляторах.

Использование миниатюрного сбалансированного манипулятора в передвижных ремонт-

ных мастерских позволяет существенно расширить их технологические возможности и обеспечить высокое качество сборки лесозаготовительных машин при ремонте.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романов, П.И. Развитие научных основ механизации общей сборки технологического оборудования лесозаготовительных машин [Текст] / П.И. Романов / СПбГЛТА.— СПб., 2001.— 208 с.

2. Романов, П.И. Сбалансированные манипуляторы для ремонтного обслуживания [Текст] / П.И. Романов, С.В. Викторенкова / Лесная промышленность.— 1996. № 3.— С. 22–26.

3. А.с. № 1618634. Сбалансированный манипулятор с ручным управлением / П.И. Романов, В.А. Ко-

ролов, С.Г. Аграновский.— Опубл. 07.01.91. в БИ № 1.

4. Еремеев, Н.С. Повышение эффективности технической эксплуатации лесозаготовительных машин на основе управления их остаточным ресурсом [Текст]: Дисс. ... докт. техн. наук / Н.С. Еремеев / МГУЛ.— М., 2005.— 387 с.

5. Патент на изобретение № 2210512. Передвижная ремонтная мастерская [Текст] / П.И. Романов, В.В. Балихин, С.В. Викторенкова. Опубл. в БИ № 23 от 20.08.2003.

УДК 621.92

Н.В.Никитков, Ю.В.Макар

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ЗАГОТОВОК ИЗ ТВЕРДЫХ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

До сих пор не существует методик обоснованного расчета и назначения режимов резания при алмазном шлифовании твердых хрупких материалов типа керамики, твердого сплава, композитов и т. п. Общеизвестна кинематическая модель режущей способности круга формы 1A1, описываемая формулой

$$Q = tV_{106}V_3, \text{ мм}^3/\text{мин}, \quad (1)$$

где  $t$ , см — глубина резания;  $V_{106} = V_{\text{пр/}n_3}$ , мм/об, — продольная подача стола за 1 оборот

заготовки;  $V_3 = \pi d_3 n_3$ , мм/мин, — окружная скорость заготовки.

Формула для  $Q$  справедлива, если зерна круга при назначенных параметрах режима  $t$ ,  $V_{106}$ ,  $V_3$  успевают снять объемный припук с заготовки. В противном случае в процессе резания возникают прижоги или сколы на поверхности заготовки, вибрации, засаливание круга. В табл. 1 (строки 1 и 2) приведен пример расчета режущей способности круга по формуле (1). Стока

Таблица 1

Режущая способность  $Q$  круга

№ п/п	$t$ , мм	$V_{106}$ , мм/об	$V_{\text{пр}}$ , мм/мин	$V_3$ , мм/мин	$n_3$ , об/мин	$d_3/d_i$ , мм	$Q$ , см <sup>3</sup> /мин
1	0,004	6	600	31416	100	100/300	0,754
2	0,003	3	300	31416	100	100/300	0,283
3	0,004	4,74	474	31416	100	100/300	0,595



3 вычислена по формуле 18-й строки табл. 2, использующей параметры алмазного круга и режимы обработки.

Обозначения:  $V_{\text{пр}}$ , мм/мин, — продольная подача заготовки;  $V_3$ , мм/мин, — окружная скорость заготовки,  $n_3$ , об/мин, — частота вращения заготовки,  $d_3/d_i$ , мм, — диаметры заготовки и круга.

Назначение наилучших режимов шлифования — неочевидная и сложная задача, зависящая от свойств материала заготовки, характеристик круга, оборудования и квалификации рабочего.

Управление процессом алмазного шлифования возможно при изучении взаимодействия зерен круга с поверхностью заготовки. Ниже приведены сведения о разрушении зернами кругов материала заготовки и режущей способности алмазных кругов при шлифовании заготовок из хрупких твердых материалов.

#### Кинематика процесса взаимодействия зерен круга с поверхностью заготовки

Рассмотрена модель режущей способности круга, учитывающая физическую возможность алмазных зерен разрушать поверхность заготовок с удалением припуска. Она позволяет вычислять реальные режимы бездефектной обработки заготовок из твердых хрупких материалов.

Режущая поверхность алмазного круга цилиндрической формы 1A1 в виде развертки на плоскости показана на рис. 2. Из связки круга выступают алмазные зерна на высоту  $Hd_2$ , равную [3] примерно  $1/3 \times D_2$ , где  $D_2$  — размер фракции зернистости круга (например,  $100/80 = D_1/D_2$ ). Наибольшая высота выступания зерен из связки у заправленных кругов зернистостью  $100/80$  [3] равна  $Hd_2 = (1/3) \times 80 \approx 27$  мкм. Слой зерен толщиной 27 мкм именуется далее режущим слоем в алмазном круге. Предельная глубина [3] внедрения зерен кругов зернистостью  $D_1/D_2 = 160/125-50/40$  в материал заготовки с  $HV = 12-25$  ГПа равна  $h_b = 0,28 \times Hd_2 \times HV^{-0,2}$ . На диаграмме (см. рис. 1) показана зависимость предельной глубины внедрения зерен кругов 160/125-50/40 в материал заготовки с различной микротвердостью ( $HV = 12-25$  ГПа). Предельная глубина внедрения зерен алмазного круга определяется свойствами материала заготовки и характеристикой круга.

При изготовлении кругов порошки связки и алмазные зерна тщательно перемешивают, добиваясь равномерного распределения. Исследо-

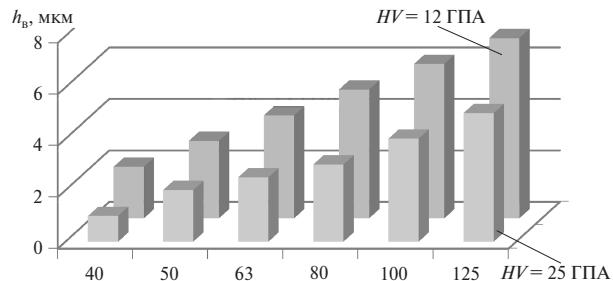


Рис. 1. Диаграммы предельных глубин внедрения зерен кругов в материал заготовки (первый ряд —  $HV = 25$ , второй —  $HV = 12$  ГПа)

ватели [1, 2] доказывают, что алмазные зерна распределены в связке равновероятно.

На рис. 2 приведены параметры зерен алмазного круга и рисок — борозд, полученных под действием этих зерен. Площадь  $S(1, 2, 3, 0_1)$  профиля борозды (рис. 2,  $\delta$ ) вычисляется по формулам

$$S(1, 2, 3, 0_1) = S(1, 0, 3, 0_1) - S(1, 0, 3, 2);$$

$$S(1, 0, 3, 0_1) = \pi r_3^2 \alpha^1 / 360^\circ;$$

$$\alpha^1 = 2 \arcsin(b/(2r_3));$$

$$S(1, 0, 3, 2) = (b/2)(r_3 - t).$$

Ширина борозды при хрупком разрушении равна  $b = K_B 2(t(2r_3 - t))^{0,5}$ , глубина профиля борозды при хрупком разрушении равна  $t_m = k_t t$ , где  $k_t$  — коэффициент углубления борозды при хрупком разрушении.

**Вычисление количества разрушающих зерен на каждом элементарном режущем диске круга толщиной  $\xi$**  (рис. 2  $a, \varepsilon$ ).

Значения параметров, характеризующих алмазный круг, сведены в табл. 2. Площадь режущей поверхности круга формы 1A1 300×10 мм равна  $S_{\text{кр}} = \pi d_i h = \pi \cdot 300 \cdot 10 / 100 = 94,25 \text{ см}^2$ .

В табл. 3 приведены зависимости для расчета параметров алмазного круга, режимов обработки и режущей способности кругов, являющиеся, по сути, математической моделью режущей способности алмазных кругов.

В табл. 2 приведены данные о плотности  $N_{0-t}$ , шт/см<sup>2</sup>, вершин алмазных зерен кругов разной зернистости в слоях по глубине от 0 до 7 мкм. Можно вычислить приращение плотности зерен по глубине профиля с дискретой 1 мкм.

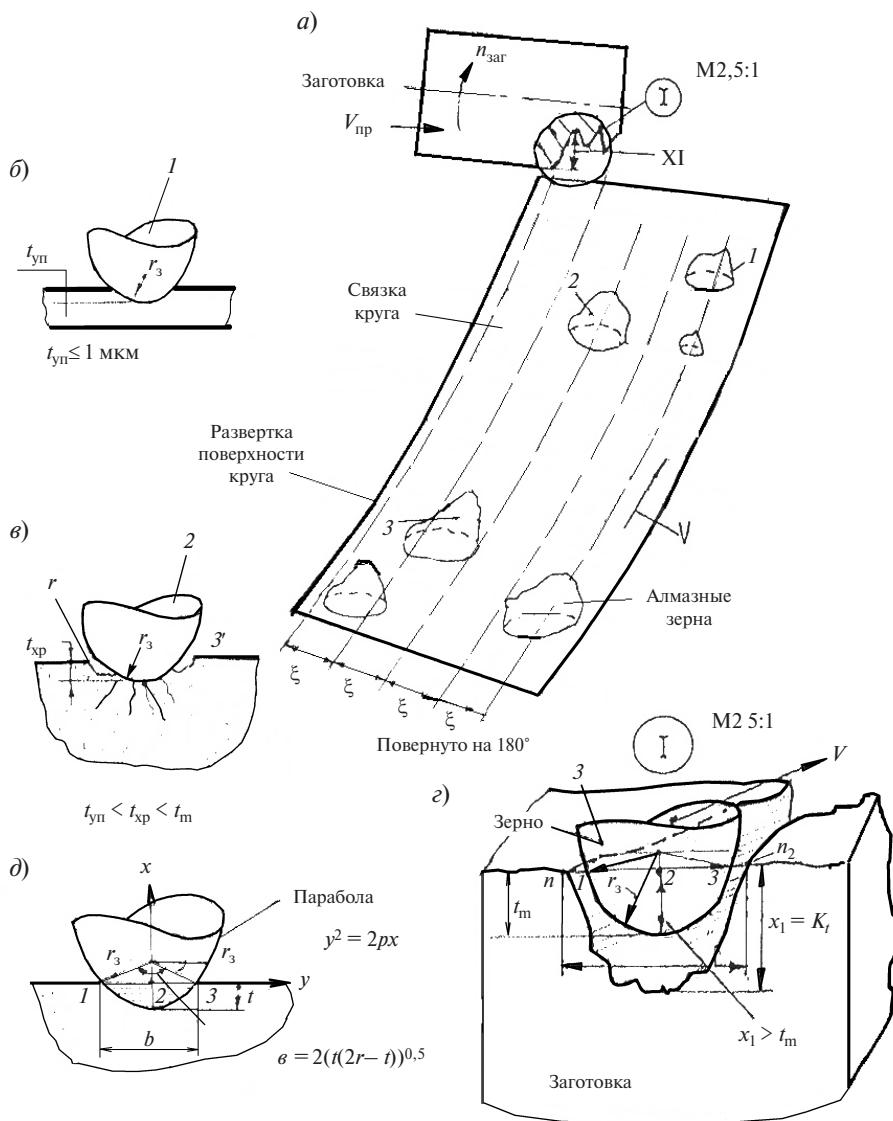


Рис. 2. Феноменологическая модель съема припуска единичными зернами круга:  
 а — движение зерен круга относительно поверхности заготовки; б — упруго-пластическое разрушение поверхности заготовки; в — хрупкое разрушение;  
 г — полное хрупкое разрушение; д — определение площади сегмента  $S(1,0,3,0_1)$

Жирным шрифтом в табл. 2 выделены глубины внедрения алмазных зерен кругов разной зернистости в материал заготовок с микротвердостью  $HV = 15$  ГПа, при которых обеспечивается хрупкое разрушение поверхности заготовок (соответствует производительному черновому шлифованию). При внедрении зерен кругов на глубину 0,5–1 мкм обеспечивается пластичное и квазихрупкое разрушение материала заготовок, что желательно производить при чистовом и получистовом шлифовании.

Вычисления производили в пакете MatCad по алгоритму, приведенному в работе [1]. Чтобы применить формулы табл. 3 для вычислений режущей способности кругов при шлифовании конкретного материала (керамики, композита и т. п.), необходимо найти в научной литературе или иметь найденные в эксперименте следующие данные: микротвердость  $HV$  материала заготовки, характеристику алмазного круга, а также уточненные параметры, поименованные в строках 1, 2, 8.

Таблица 2

**Параметры алмазных кругов в режущем слое от 0 до 7 мкм**

№ п/п	Слой 0– $t$ , мкм	Плотность $N(0–t)$ , шт./см <sup>2</sup> , зерен в слое (0– $t$ ) для кругов с указанной зернистостью		
		160/125	125/100	100/80
1	0–1	2,615	3,094	1,851
2	0–2	5,10	6,01	3,634
3	0–3	7,48	8,74	5,35
4	0–4	<b>9,2</b>	<b>10,0</b>	7,003
5	0–5	11,9	13,7	8,59
6	0–6	13,9	16,0	<b>10,12</b>
7	0–7	15,9	18,1	11,6

В строках 11–14 модели использован прием мысленного разбиения высоты алмазного круга на элементарные диски, толщина каждого диска равна ширине  $b$  борозды (строка 1). На каждом таком диске вычислено количество (строка 13) вершин режущих зерен, что позволяет судить о способности этого диска прорезать или не прорезать борозду. Если на диске окажется более одной вершины, то у него имеется запас по режущей способности.

Например, алмазный круг за один оборот совершают  $n_u/n_3 = 3000/100 = 30$  оборотов, прорезая за это время зернами круга большое число борозд (строка 15). Если их расположить на поверхности цилиндра заготовки касательно по ширине и длине, то получится шлифованная поверхность (строка 15 табл. 3) длиной, равной  $V_{106}$ . Формула  $V_{106}$  использована в строке 18 для получения зависимости режущей способности круга.

**Параметры режимов обработки  
и режущей способности алмазных кругов**

№ п/п	Название параметра, единицы измерения	Формула для вычисления параметра	Значения параметра для трех вариантов зернистости кругов		
			160/125	125/100	100/80
1	$b$ — ширина борозд, мм	$b = K_b 2[(t(2r_3 - t)]^{1/2}$	0,159	0,120	0,085
2	$K_b$ — коэффициент расширения борозд	Экспериментальная величина	7,60	6,90	6,00
3	$t$ — глубина резания зерна, мкм	Заданная величина	4	3,5	3,0
4	$a$ — центральный угол одной борозды, град	$a = 2\arccos(1 - t/r_d)$	1,45	1,36	1,26

## Окончание табл. 3

№ п/п	Название параметра, единицы измерения	Формула для вычисления параметра	Значения параметра для трех вариантов зернистости кругов		
			160/125	125/100	100/80
5	$L_6$ — длина дуги одной борозды, град	$L_6 = \pi da/360$	1,265	1,19	1,10
6	$N_6$ — число борозд на одной окружности заготовки, шт.	$N_6 = 360/a$	248,3	264,7	285,7
7	$N_{kp}(0-1)$ — число зерен круга в слое (0—1), шт./круг	$N_{kp}(0-1) = N(0-1) S_{kp}$	246,5	291,6	342,5
8	$r_3$ — радиус при вершине зерна, мкм	Экспериментальная величина	15,6	12,5	9,8
9	$N(0-t)$ — плотность зерен, шт./см <sup>2</sup>	Расчетная (согласно [1]) величина	9,2	10,03	10,12
10	$N_{kp}$ — число зерен круга на поверхности круга в слое (0—t), шт.	$N_{kp}(0-t) = N(0-t) \cdot S_{kp}$ , шт.	867,1	945,3	953,81
11	$N_{элд}$ — число элементарных дисков на круге, шт.	$N_{элд} = h/b$ ,	63,07	83,27	117
12	$n_{1элд}$ — число зерен на одном элементарном диске в слое (0—t), шт.	$n_{1элд} = N(0-t) S_{kp} / N_{элд}$	13,75	11,35	8,2
13	$n_{1элд}(0-1)$ — число зерен на одном эл.диске в слое (0—1), шт.	$n_{1элд} = N(0-1) S_{kp} / N_{элд}$	3,91	3,50	1,49
14	$n_{1элд}(1-t)$ — число зачищающих зерен в слое (1-t) на одном элементарном диске, шт.	$n_{1элд}(1-t) = N(1-t) S_{kp} / N_{элд}$ , шт.	9,84	7,85	6,66
15	$V_{1об}$ — длина цилиндра на заготовке, вся поверхность которого покрыта бороздами от вершин зерен круга в слое (0—1) за 1 ее оборот, мм/об. заг.	$V_{1об} = b N_{kp}(0-1) \times (n_u/n_3) / N_6$ ,	4,735	3,65	3,057
16	$V_{пр max}$ — суммарная ширина борозд от вершин зерен круга в слое (0—1) при глубине резания t заданных $n_u$ , об/мин*	$V_{пр max} = b N_{kp}(0-1) n_u$ , м/мин ( $n_3 = 0$ , $n_u = 3000$ об/мин)	117,6	105,0	87,3
17	$V_{пр ф}$ — фактическая продольная подача стола относительно круга при глубине резания $t_{ф}$ и частотах вращения $n_u$ и $n_3$ , м/мин	$V_{пр ф} = V_{пр max} t / t_{ф}$ , ( $t_{ф}$ задается технологоом)	0,474	0,397	0,3055
18	$Q_{max}$ = режущая способность круга, см <sup>3</sup> /мин	$Q_{max} = t V_{1об} V_3 = t b N_{kp}(0-1) \times n_u / n_3 \pi d_3 / N_6$	0,595	0,3958	0,24

\* Геометрически это — длина линейки шириной, равной одной борозде.

\*\* Геометрически это — длина цилиндра на заготовке, заполненная касающимися друг друга бороздами от зерен.



Алгоритм компьютерного вычисления всех технологических параметров процесса алмазного шлифования легко строится по формулам, приведенным в табл. 3. Для всех используемых при черновом шлифовании алмазных кругов зернистостью (160/125)–(100/80) вычислены в Exel технологические параметры и приведены в табл. 3. Аналогично для получистовых и чистовых процессов шлифования могут быть получены значения технологических параметров при задании соответствующих переменных в строках 1–3 табл. 3.

На основе анализа [1–3] процесса шлифования и вычислений плотности  $N(0-t)$ , шт/см<sup>2</sup>, зерен в алмазных кругах, среднего радиуса  $r_3$  вершин зерен кругов различной зернистости, полученных результатов исследований по разрушению поверхности заготовок кругами (параметры  $b$  и  $K_b$ ) стало возможным прогнозировать параметры процесса алмазного шлифования хрупких твердых материалов заготовок (строки 1–18 в табл. 3).

Использован прием воображаемого деления высоты алмазного круга на элементарные диски (их число —  $N_{\text{эл.д.}} = h/\varepsilon$ , шт). Ширина у каждого диска равна ширине  $\varepsilon$ , мм, борозды, сформированной зернами круга, вершины которых лежат в самом верхнем (0–1 мкм) слое, т. е. оставляют

самые глубокие риски на шлифуемой поверхности заготовки.

Получена зависимость для расчета числа  $N_{1\text{эл.д.}}(0-1)$  зерен в слое (0–1 мкм) на одном элементарном диске, позволяющая определять суммарную ширину борозд круга от вершин зерен в слое (0–1) за 1 оборот или любое число оборотов круга. Поскольку на каждом элементарном диске круга для рассматриваемых зернистостей число зерен в слое (0–1) равно от 3,91 до 1,49, то практически весь припуск снимается вершинами этих зерен.

Стало возможным вычислять максимальную продольную подачу стола станка при глубине резания  $t$ , мкм, по формуле

$$V_{\text{пр.макс.}} = bN_{\text{кп.}}(0-1)n_i/N_6, \text{ м/мин.}$$

Установлена зависимость для вычисления режущей способности круга, равная

$$Q_{\text{max}} = tV_{1\text{об.}}V_3 = \\ = tbN_{\text{кп.}}(0-1)(n_i/n_3)\pi d_3 n_3/N_6, \text{ см}^3/\text{мин.}$$

Формулы (строки 1–18 табл. 3) позволяют управлять процессом шлифования алмазными кругами при черновых процессах. При этом используются задаваемые параметры режимов обработки ( $n_i$ ,  $n_3$ ,  $t$ ,  $d_3$ ,  $d_i$ ) и вычисляемые ( $n_3 V_{1\text{об.}} = V_{\text{пр.}}$ ,  $Q_{\text{max}}$ ).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абразивная и алмазная обработка материалов [Текст]: Справочник / Под ред. А.Н. Резникова.— М.: Машиностроение, 1977.— 391 с.
2. Ваксер, Д.Б. Алмазная обработка технической керамики [Текст] / Д.Б. Ваксер, Н.В. Никитков [и др.].— Л.: Машиностроение, 1976.— 160 с.
3. Никитков, Н.В. Математическое моделирование процессов алмазной абразивной обработки хрупких керамических материалов [Текст] / Н.В. Никитков // Сб.: Математическое моделирование в машиностроении.— Труды СПбГПУ. № 466.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 1997.— 40 с.

УДК 629.1.032.001

*P.B. Русинов, Р.Ю. Добрецов*

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОВОГО ЦИКЛА «АДИАБАТНОГО» ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С КОМБИНИРОВАННЫМ НАДДУВОМ

В наиболее экономичных силовых установках, а именно, с поршневыми двигателями внутреннего сгорания (ДВС) — до 30–35 % потенциальной энергии топлива непроизводительно теряется на их охлаждение.

И представлялось вполне естественным, что термоизоляция камер сгорания рабочих цилиндров ДВС могла бы увеличить полезное использование потенциальной энергии топлива и повысить и мощность и экономичность так



называемых «адиабатных» двигателей с ограниченными тепловыми потерями.

Однако, как показали натурные испытания и расчетно-теоретические исследования процесса работы подобных двигателей, положительный комплексный эффект от термоизоляции камер сгорания практически отсутствовал.

Действительно, среднее эффективное давление теплового цикла, а следовательно, мощность «адиабатных» двигателей заметно увеличивались, однако эффективный КПД и удельный расход топлива безнадежно отставали от таковых у двигателей «обычного» типа.

При этом, кстати, существенно возрастала температура выпускных газов, что в принципе могло бы служить энергетическим резервом, в частности для повышения КПД теплового цикла при комбинированном наддуве «адиабатных» двигателей, имеющих турбокомпрессор (ТК) и механическую связь с коленчатым валом двигателя, за счет использования реальной избыточной механической энергии газовой турбины ТК на предельных нагрузках ДВС.

Для расчетной проверки подобной возможности необходима разработка математической модели теплового цикла, в нашей работе для конкретности, ориентированной на технические данные дизеля ЯМЗ-238.

ЯМЗ-238 (8Ч13/14) — восьмицилиндровый четырехтактный дизель с неразделенными камерами сгорания, эффективной мощностью  $N_e = 176,5 \text{ кВт}$  (240 л.с.), с числом оборотов коленчатого вала  $n = 2100 \text{ мин}^{-1}$ , средним эффективным давлением рабочего цикла  $p_e = 0,678 \text{ МПа}$ , максимальным давлением сгорания топлива  $p_z = 8,5 \text{ МПа}$ , удельным эффективным расходом топлива  $g_e = 0,236 \text{ кг/кВт}\cdot\text{ч}$ , эффективным КПД  $\eta_e = 0,360$ , степенью сжатия  $\varepsilon = 16,5$ , коэффициентом избытка воздуха при сгорании топлива  $\alpha = 1,5$ , механическим КПД  $\eta_m = 0,850$  и коэффициентом наполнения цилиндров  $\eta_v = 0,85$ .

При низшей теплотворной способности дизельного топлива  $Q_T^h = 10000 \text{ ккал/кг}$  (42000 кДж/кг), теоретически необходимой для сжигания единицы массы дизельного топлива масса воздуха  $L_0 = 14,3 \text{ кг/кг}$  и  $\alpha = 1,5$ , общее теплосодержание единицы массы рабочей смеси с учетом единичной массы топлива равно  $Q_0 = Q_T^h / 1 + \alpha L_0 = 10000 / 1 + 1,5 \cdot 14,3 = 445,4 \text{ ккал/кг}$ .

При этом для производства только механической энергии с очевидностью используется лишь доля от общей тепловой энергии рабочей смеси, определяемая эффективным КПД двигателя, механическими потерями и теплопотерями в политропических процессах сжатия и расширения рабочего тела и потерями на теплорассеяние во внешнюю среду.

Оценивая последние потери величиной в 8 %, найдем «полезную» энергию  $Q_1$  в доле от общей энергии (см. рис. 1):

$$Q_1 = Q'_1 + Q''_1 = [\eta_e + (1 - \eta_m) - 0,08] Q_0 = \\ = [0,36 + (1 - 0,85) - 0,08] \cdot 445,4 = 192 \text{ ккал/кг.}$$

При показателях политроп сжатия  $n_1 = 1,37$  и расширения  $n_2 = 1,22$ , начальных давлении в цилиндрах двигателя  $p_a = 0,083 \text{ МПа}$  (0,85 кгс/с<sup>2</sup>) и температуре  $T_a \approx T_0 = 290 \text{ К}$ , теплоемкостях рабочего тела при постоянном объеме и постоянном давлении соответственно  $c_v = 0,17$  и  $c_p = 0,23 \text{ ккал/(кг}\cdot\text{град)}$  давления и температуры в узловых точках теплового цикла (см. рис. 1) составят [1]

$$p_c = p_a \varepsilon^{n_1} = 0,083 \cdot 16,5^{1,37} = 3,86 \text{ МПа};$$

$$T_c = T_a \varepsilon^{n_1-1} = 290 \cdot 16,5^{1,37-1} = 818,2 \text{ К.}$$

Степень повышения давления в цилиндре равна

$$\lambda = p_z / p_c = 8,5 / 3,86 = 2,2.$$

Отсюда  $T_y = \lambda T_c = 2,2 \cdot 818,2 = 1800 \text{ К}$ ;

$$Q'_1 = c_v (T_y - T_c) =$$

$$= 0,17 (1800 - 818,2) = 167 \text{ ккал/кг};$$

$$Q''_1 = Q_1 - Q'_1 = 192 - 167 = 25 \text{ ккал/кг};$$

$$T_z = Q''_1 / c_p + T_y = 25 / 0,23 + 1800 = 1908,7 \text{ К.}$$

Степень предварительного расширения

$$\rho = V_z / V_a = T_z / T_y = 1908,7 / 1800 = 1,060;$$

степень последующего расширения

$$\delta = V_a / V_z = \varepsilon / \rho = 16,5 / 1,060 = 15,57.$$

Отсюда  $p_b = p_z / \delta^{n_2} = 8,5 / 15,57^{1,22} = 0,30 \text{ МПа.}$

$$T_b = T_z / \delta^{n_2-1} = 1908,7 / 15,57^{1,22-1} = 1043,4 \text{ К.}$$



Среднее индикаторное давление цикла [2]

$$\begin{aligned}
 p_i^p &= \frac{p_c}{\varepsilon-1} \times \\
 &\times \left[ \lambda(\rho-1) + \frac{\lambda\rho}{n_2-1} \left( 1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}} \right) - \frac{1}{n_1-1} \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1-1}} \right) \right] = \\
 &= \frac{3,86}{16,5-1} \left[ 2,2(1,060-1) + \frac{2,2 \cdot 1,060}{1,22-1} \times \right. \\
 &\times \left. \left( 1 - \frac{1}{15,57^{1,22-1}} \right) - \frac{1}{1,37-1} \left( 1 - \frac{1}{16,5^{1,37-1}} \right) \right] = \\
 &= 0,795 \text{ МПа.}
 \end{aligned}$$

В первом приближении (тепловые потери в политропических процессах сжатия и расширения учтены выше) индикаторный КПД  $\eta_i$  для участка «*z*–*b*» цикла (см. рис. 1) определяется соотношением

$$\begin{aligned}
 \eta_i^0 &= (T_z - T_b) / T_z = \\
 &= (1908,7 - 1043,4) / 1908,7 = 0,453.
 \end{aligned}$$

При этом ход поршня соответствует отношению  $\delta = V_a / V_z$ , и для приведения КПД к полному ходу значение  $\eta_i^0$  следует умножить на отношение  $\delta/\varepsilon = 1/\rho$ :

$$\eta_i^p = \eta_i^0 / \rho = 0,453 / 1,060 = 0,427.$$

Далее в соответствии с функциональной зависимостью для механического КПД от мощности двигателя [3] получаем

$$\eta_m^p = N_e^p / \left( N_e^p + N_e \frac{1 - \eta_m}{\eta_m} \right),$$

где  $N_e$  и  $\eta_m$  – фактические данные «базового» двигателя.

Поскольку  $N_e^p = \eta_m^p N_i^p$ ,  $N_e = \eta_m N_i$ , а  $N_i^p$  и  $N_i$  для различной степени форсирования конкретного двигателя пропорциональны соответственно только  $p_i^p$  и  $p_i$ , то после преобразований имеем  $\eta_m^p = 1 - (1 - \eta_m) p_i^p / p_i$ .

Для дизеля ЯМЗ-238  $\eta_m = 0,850$ ,  $p_i = p_e / \eta_m = 0,678 / 0,850 = 0,798$ , и для любой его мощности  $\eta_m^p = 1 - (1 - 0,850) 0,798 / \eta_i^p = 1 - 0,12 / p_i^p$ .

Для рассчитываемого варианта (табл. 1, поз. 1)

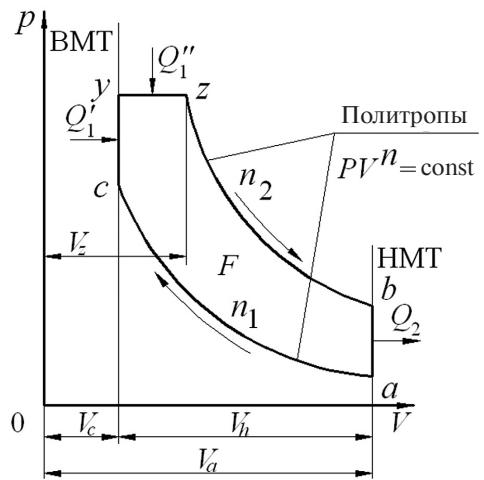


Рис. 1. Расчетная схема теплового цикла быстроходного дизеля (индикаторная диаграмма):

$p$  – давление;  $V$  – объем;  $V_a$  – полный объем цилиндра;  $V_c$  – объем камеры сгорания;  $V_h$  – рабочий объем;  $V_z$  – объем на конец предварительного расширения;  $V_b$  – объем на конец процесса расширения;  $Q_1' + Q_1'' = Q_1$  – теплота, подводимая к рабочему телу;  $Q_2$  – отводимая теплота;  $n_1$  и  $n_2$  – показатели политроп сжатия и расширения;  $F$  – площадь индикаторной диаграммы; ВМТ – верхняя мертвая точка положения поршня; НМТ – нижняя мертвая точка

$$\eta_m^p = 1 - 0,12 / 0,795 = 0,849$$

и

$$\eta_e^p = \eta_m^p \eta_i^p = 0,849 \cdot 0,427 = 0,363;$$

Соответственно, расчетные эффективный КПД и удельный расход топлива составят

$$\eta_e^p = \eta_m^p \eta_i^p = 0,849 \cdot 0,427 = 0,363;$$

$$\begin{aligned}
 g_e &= 3600 / Q_T^H \cdot \eta_e^p = \\
 &= 3600 / 42000 \cdot 0,363 = 0,236 \text{ кг/кВт·ч.}
 \end{aligned}$$

Эффективная мощность  $N_e^p = N_e p_e^p / p_e = 175,5 \cdot 0,675 / 0,678 = 175,7 \text{ кВт}$ .

Все основные расчетные величины, такие, как  $p_e^p$ ,  $\eta_e^p$ ,  $g_e^p$  и  $N_e^p$ , по сути тождественны исходным показателям дизеля ЯМЗ-238 (поз. 1, табл. 1). Следовательно, предлагаемая математическая модель работоспособна.

Применительно к двигателю с теплоизолированными камерами сгорания аналогичные расчеты проведены с градацией роста дополнительных

Таблица 1

Параметры теплового цикла с частичным использованием теплоты, теряемой на охлаждение камер сгорания двигателя

№ п/п	$Q_l$ , ккал/кг	$Q_l^r$ , ккал/кг	$T_s^*$ , К	$p$ , МПа	$T_c^*$ , МПа	$\rho$	$\delta$	$p_i$ , МПа	$\eta^p$	$\eta_m$	$p_c^p$ , МПа	$N_c^p$ , кВт	$\eta_c^p$	$g_e^p$ , г/кВт·ч
1	192	25	1908,7	0,30	1043,4	1,060	15,57	0,795	0,427	0,849	0,675	175,7	0,363	236
2	212	44	1991,3	0,31	1098,9	1,106	14,91	0,858	0,405	0,861	0,739	192,5	0,349	246
3	232	64	2078,3	0,33	1157,7	1,155	14,29	0,924	0,384	0,871	0,805	209,5	0,334	256
4	252	84	2165,2	0,35	1217,0	1,203	13,72	0,988	0,364	0,880	0,869	226,3	0,320	268
5	272	104	2252,2	0,37	1276,9	1,251	13,19	1,052	0,346	0,887	0,933	243,0	0,307	279

 $p_s = 8,5 \text{ МПа}, p_a = 0,083 \text{ МПа}, p_c = 3,86 \text{ МПа}, T_a = 290 \text{ К}, T_c = 818,2 \text{ К}, T_y = 1800 \text{ К}, Q_l' = 167 \text{ ккал/кг}; \varepsilon = 16,5, \lambda = 2,2; n_1 = 1,37, n_2 = 1,22;$ 
 $c_s = 0,17 \text{ ккал/кг·град}; c_p = 0,23 \text{ ккал/кг·град}$ 

Таблица 2

Эффективность теплового цикла «адиабатного» двигателя с комбинированным надувом

№ п/п	$Q_l^h$ , ккал/кг	$\rho^h$	$T_s^h$ , К	$p_i^h$ , МПа	$\eta_m$	$N_i^h$ , кВт	$p_e^h$ , МПа	$\eta_e^h$	$g_e^h$ , г/кВт·ч	$G_z^h$ , кг/с	$G_r^h$ , кг/с	$T_r$ , К	$L_{T_{\text{анн}}}$ , кВт	$N_{T_{\text{анн}}}$ , кВт	$\sum N_e^h$ , кВт	$\sum \eta_m^h$	$\sum g_e^h$ , г/кВт·ч	$\sum \eta_e^h$		
1	165	1,054	1990,1	1097,8	1,081	0,889	250,20	0,961	0,378	0,227	0,467	36,99	0,485	1031,8	119,76	40,98	254,20	0,891	0,226	0,381
2	185	1,100	2077,1	1157,0	1,217	0,902	285,73	1,098	0,363	0,236	0,554	43,88	0,577	1083,3	125,66	51,16	293,01	0,904	0,235	0,365
3	205	1,146	1216,9	1,320	0,909	312,42	1,200	0,347	0,247	0,634	50,21	0,659	1135,4	131,70	61,24	323,49	0,912	0,246	0,348	4
4	225	1,192	2251,0	1277,3	1,421	0,916	338,80	1,301	0,332	0,258	0,718	56,87	0,746	1187,9	137,80	73,56	355,49	0,919	0,257	0,334
5	245	1,238	2337,9	1338,2	1,521	0,921	364,88	1,402	0,318	0,269	0,807	63,91	0,838	1240,9	143,94	86,32	387,89	0,926	0,267	0,321

 $\alpha^h = 1,8; \varepsilon^h = 14; \varphi = 1,15; Q_l^h = 12,3 \text{ МПа}; p_c^h = 6,87 \text{ МПа}; \lambda = 1,79; p_k = 0,18 \text{ МПа}; \rho_\Sigma = 0,15 \text{ МПа}; Q_l' = 141,7 \text{ ккал/кг}; T_a^h = 387,1 \text{ К};$



тельной «полезной» тепловой энергии  $\Delta Q_1$ : 20, 40, 60, и 80 ккал/кг. Полученные при этом расчетные данные приведены в поз. 2–5 табл. 1.

Как видно по табл. 1, при увеличении  $Q_1$  существенно возрастает среднее эффективное давление  $p_e^h$  теплового цикла, однако эффективный КПД  $\eta_e^h$  «адиабатного» двигателя неуклонно убывает, температура  $T_b$  выпускных газов растет, а следовательно, непроизводительные потери возрастают.

Для форсированного дизеля ЯМЗ-238 первоначально только в варианте «свободного» газотурбинного наддува (без механической связи турбокомпрессора с двигателем) возможное для него эффективное давление  $p_e^h$  и мощность  $N_e^h$  при принятом давлении наддува  $p_k = 0,18$  МПа и, естественно, увеличенном коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,8$  может быть определено по формуле [1]

$$p_k = p_0 + m_0 (\lambda^h - 1),$$

где

$$\lambda^h = p_e^h \alpha^h / p_e \alpha, \text{ а } m_0 = 0,12,$$

или

$$\begin{aligned} p_e^h &= \frac{\alpha p_e}{\alpha^h} \left( \frac{p_k - p_0}{m_0} + 1 \right) = \\ &= \frac{1,5 \cdot 0,678}{1,8} \left( \frac{0,18 - 0,098}{0,12} + 1 \right) = 0,951 \text{ МПа}; \end{aligned}$$

$$N_e^h = N_e p_e^h / p_e = 176,5 \cdot 0,951 / 0,678 = 247,6 \text{ кВт.}$$

Сообразно предыдущему проведем расчет при наддуве:

$$\begin{aligned} \eta_m^h &= N_e^h / \left( N_e^h + N_e \frac{1 - \eta_m}{\eta_m} \right) = \\ &= 247,6 / \left( 247,6 + 176,5 \frac{1 - 0,85}{0,85} \right) = 0,888 \end{aligned}$$

и

$$p_i^h = p_e^h / \eta_m^h = 0,951 / 0,888 = 1,071.$$

При реальном условии равенства индикаторных КПД форсированного и нефорсированного двигателей удельный расход топлива составит

$$g_e^h = g_e \eta_m^h / \eta_i^h = 236 \cdot 0,850 / 888 =$$

$$= 225,9 \text{ кг/кВт·ч.}$$

Выигрыш в расходе топлива по отношению к таковому у нефорсированного двигателя (поз. 1 табл. 1) составляет примерно 10 г/кВт·ч (7,35 кг/л.с·ч), реальность чего, кстати говоря, подтверждается практикой эксплуатации дизелей.

#### Эффективный КПД

$$\eta_e^h = \frac{3600}{Q_T^h g_e^h} = \frac{3600}{42000 \cdot 0,225,9} = 0,379.$$

Для определения параметров цикла дизеля с газотурбинным наддувом (ГТН) ранее принятая теплопотеря в 8 % в данном случае уменьшается до 5 %, поскольку увеличение при наддуве теплонапряженности камер сгорания конкретного ДВС практически не изменяет поверхности охлаждения этих камер.

Таким образом, при общей вносимой в цикл удельной теплоте  $Q_0^h = Q_T^h / (1 + \alpha^h L_0) = 10000 / (1 + 1,8 \cdot 14,3) = 374$  ккал/кг тепловая энергия, используемая только для производства механической работы, равна

$$\begin{aligned} Q_1^h &= \\ &= [0,379 + (1 - 0,888) - 0,05] \cdot 374 = 165,0 \text{ ккал/кг.} \end{aligned}$$

Для форсированного цикла принимается:  $p_z^h = 12,3$  МПа;  $\varepsilon_h = 14$ ;  $\alpha^h = 1,8$ ;  $\eta_1 = 1,38$ ;  $\eta_2 = 1,23$ ; давление наддува  $p_k = 0,18$  МПа, давление перед газовой турбиной ТК  $p_T = 0,15$  МПа.

Начальное давление в цилиндрах ДВС  $p_a^h = p_k = 0,18$  МПа.

Для более полного использования тепловой энергии выпускных газов промежуточный холодильник воздуха перед его поступлением в цилиндры двигателя исключается, и поэтому начальная температура воздуха  $T_a^h = T_k$ , где  $T_k$  — температура воздуха на выходе из центробежного компрессора.

При степени повышения давления  $\pi_k = p_k / p_0 = 0,18 / 0,098 = 1,84$  и показателе политропы процесса сжатия в компрессоре  $\eta_0 = 1,9$  начальная температура воздуха в цилиндрах двигателя будет

$$T_a^h = T_k = T_0 \pi_k^{\eta_0 - 1} = 290 \cdot 1,84^{1,9 - 1} = 387,1 \text{ К.}$$

По аналогии с расчетом для нефорсированного двигателя вычисляем:

$$p_c^h = 0,18 \cdot 14^{1,38} = 6,87 \text{ МПа;}$$

$$T_c^h = 387,1 \cdot 14^{1,38 - 1} = 1055,2 \text{ К;}$$

$$\lambda = 12,3 / 6,87 = 1,79;$$

$$T_y^H = 1,79 \cdot 1055,2 = 1888,8 \text{ K};$$

$$Q'_l = 0,17(1888,8 - 1055,2) = 141,7 \text{ ккал/кг};$$

$$Q''_l = 165 - 141,7 = 23,3 \text{ ккал/кг};$$

$$T_z^H = 23,3 / 0,23 + 1888,8 = 1990,1 \text{ K};$$

$$\rho = 1990,1 / 1888,8 = 1,054;$$

$$\delta = 14 / 1,054 = 13,28;$$

$$p_b = 12,3 / 13,28^{1,23} = 0,511 \text{ МПа};$$

$$T_b^H = 1990,1 / 13,28^{1,23-1} = 1097,8 \text{ K};$$

$$p_i^H = \frac{6,87}{14-1} (0,037 + 3,678 - 1,67) = 1,081 \text{ МПа};$$

$$\eta_m^H = 1 - 0,12 / 1,081 = 0,889;$$

$$p_e^H = 0,889 \cdot 1,081 = 0,961 \text{ МПа};$$

$$\eta_e^H = 0,889(1990,1 - 1097,8) / 1990,1 \cdot 1,054 = 0,378.$$

$$g_e^H = 3600 / 42000 \cdot 0,378 = 0,227 \text{ кг/кВт\cdotч};$$

$$N_t^H = 176,5 \cdot 0,961 / 0,678 = 250,2 \text{ кВт}.$$

В данном случае также имеет место хорошее совпадение основных показателей теплового цикла с предварительно установленными.

Расчетные данные по двигателю с ГТН, включая и его «адиабатные» варианты, представлены в табл. 2 (поз. 1–5, графы 2–11).

Очевидно, и при «свободном» газотурбинном наддуве не исключаются характерные особенности «адиабатных» двигателей — рост их мощности и падение КПД с увеличением  $\rho$ .

Следующий расчетный этап — анализ работы газотурбокомпрессора (табл. 2, графы 12–17).

В выпускном трубопроводе двигателя сообразно расчетному расходу выпускных газов практически устанавливается принятое давление  $p_t = 0,15 \text{ МПа}$ .

При этом процесс расширения газов в трубопроводе с давления  $p_b$  — изотермический, поскольку снижение температуры при расширении компенсируется ее повышением за счет энергии торможения газового потока.

Однако за счет продувочного воздуха ( $\phi = 1,15$ ) температура  $T_b^H$  несколько снижается,

и реальную температуру газа перед турбиной можно оценить по выражению

$$T_t^H \approx \frac{T_b^H G_b^H / \phi + T_n G_b^H (\phi - 1) / \phi}{G_r^H},$$

где  $G_b^H / \phi$  — количество воздуха в цилиндрах двигателя, непосредственно используемого в тепловом процессе;  $G_b^H (\phi - 1) / \phi$  — избыточное количество воздуха;  $G_r^H$  — количество выпускных газов;  $T_n$  — температура продувочного воздуха на выходе из цилиндров.

Полагая  $G_b^H \approx G_r^H$ , а нагрев продувочного воздуха в цилиндрах (дополнительно к его исходной температуре  $T_k = 387,1 \text{ K}$ ) примерно,  $200^\circ\text{C}$ , окончательно имеем  $T_t^H \approx 0,87 T_b^H + 76,7 \text{ K}$  ( $T_n \approx 590 \text{ K}$ ).

Производительность компрессора [4] —  $G_b^H = \frac{N_e^H g_e^H \alpha^H \phi L_0}{3600}$ ; расход выпускных газов —  $G_r^H = G_b^H (1 + 1/\alpha L_0)$ .

Мощность компрессора ТК составит

$$N_k = G_b^H L_{k \text{ ад}} / \eta_{k \text{ ад}},$$

где  $\eta_{k \text{ ад}}$  — адиабатический КПД компрессора [4].

Мощность газовой турбины равна

$$N_T = G_r^H L_{k \text{ ад}} \eta_T,$$

где  $\eta_T = \eta_{T \text{ ад}} \eta_{TK \text{ mech}}$  ( $\eta_{T \text{ ад}}$  — по ГОСТ 9658–81;  $\eta_{TK \text{ mech}} = 0,98$ ).

Адиабатическая работа компрессора:

$$L_{k \text{ ад}} = \frac{k}{k-1} R_b T_0 \left( \pi_k^{(k-1)/k} - 1 \right),$$

где газовая постоянная —  $R_b = 0,287 \text{ кДж/кг\cdotград}$ ,  $T_0 = 290 \text{ K}$ , показатель адиабаты воздуха —  $k = 1,4$ .

Работа газовой турбины:

$$L_{T \text{ ад}} = \frac{k'}{k'-1} R_r T_t \left( 1 - \left( \frac{p_0}{p_T} \right)^{(k'-1)/k'} \right),$$

где  $R_r = 0,288 \text{ кДж/кг\cdotград}$ ,  $k' = 1,35$ .

В частности для табл. 2, поз. 1:

$$G_b^H = \frac{250,2 \cdot 0,227 \cdot 1,8 \cdot 1,15 \cdot 14,3}{3600} = 0,467 \text{ кг/с};$$

$$L_{k \text{ ад}} = \frac{1,4}{1,4-1} \cdot 0,287 \cdot 290 \times$$

$$\times \left( 1,84^{(1,4-1)/1,4} - 1 \right) = 55,44 \text{ кДж}.$$



Для расчетных  $G_{\text{в}}^{\text{H}}$  и  $\pi_k = p_k/p_0 = 0,18/0,098 = 1,84$  по ГОСТ 9658–81 требуется турбокомпрессор ТКР-11, для которого  $\eta_{k \text{ ад}} = 0,7$ ,  $\eta_{T \text{ ад}} = 0,72$ .

Для него

$$N_k = 0,467 \cdot 55,44 / 0,7 = 36,99 \text{ кВт};$$

$$G_{\text{r}} = 0,467 \left( 1 + \frac{1}{1,8 \cdot 14,3} \right) = 0,485 \text{ кг/с};$$

$$T_{\text{r}} = 0,87 \cdot 1097,8 + 76,7 = 1031,8 \text{ К};$$

$$L_{T \text{ ад}} = \frac{1,35}{1,35 - 1} \cdot 0,288 \cdot 1031,8 \times \left( 1 - \left( \frac{0,098}{0,15} \right)^{(1,35-1)/1,35} \right) = 119,76 \text{ кДж/кг};$$

$$N_T = 0,485 \cdot 119,76 \cdot 0,72 \cdot 0,98 = 40,98 \text{ кВт} \\ (\eta_{\text{ТКмех}} = 0,98).$$

Расчетные данные для всего комплекса рассматриваемых вариантов тепловых циклов представлены в графах 12–17 табл. 2.

В заключительной стадии расчетов двигателя с комбинированным наддувом (графы 18–21):

суммарная мощность

$$\sum N_e^{\text{H}} = N_e^{\text{H}} + (N_T - N_k) \text{ кВт};$$

механический КПД

$$\sum \eta_m^{\text{H}} = \frac{\sum N_e^{\text{H}}}{\sum N_e^{\text{H}} + N_e^{\text{H}} \frac{1 - \eta_m^{\text{H}}}{\eta_m^{\text{H}}}};$$

расход топлива

$$\sum g_e^{\text{H}} = \frac{\eta_m^{\text{H}}}{\sum \eta_m^{\text{H}}} g_e^{\text{H}} \text{ кг/кВт·ч};$$

эффективный КПД

$$\sum \eta_e^{\text{H}} = \frac{3600}{42000 \cdot \sum g_e^{\text{H}}}.$$

Для табл. 2, поз. 1:

$$\sum N_e^{\text{H}} = 250,2 + (40,98 - 36,99) = 254,2 \text{ кВт};$$

$$\sum \eta_m^{\text{H}} = \frac{254,2}{254,2 + 250,2 \frac{1 - 0,889}{0,889}} = 0,891;$$

$$\sum g_e^{\text{H}} = \frac{0,889}{0,891} 227 = 226 \text{ г/кВт·ч};$$

$$\sum \eta_e^{\text{H}} = \frac{3600}{42000 \cdot 0,225} = 0,381.$$

По результатам полных расчетов (см. табл. 2) очевидно, что эффективность работы «адиабатного» двигателя с комбинированным наддувом по сравнению с таковой у нефорсированного двигателя (см. табл. 1) заметно улучшилась, но в общих соотношениях мощности и экономичности при форсировании, по существу, ничего не изменилось.

К примеру, по поз. 1 и 5 табл. 2 (графа 20) удельный расход топлива «адиабатного» двигателя увеличился на 41 г/кВт·ч, а КПД уменьшился с 0,381 до 0,321.

Таким образом, «адиабатный» двигатель и с комбинированным наддувом также неконкуреноспособен по экономичности по сравнению с двигателем «обычного» типа.

Проведенное исследование показало, что при заданном максимальном давлении  $p_z$  сгорания топлива возможно полезное использование вносимого в цикл «добавочного» количества теплоты только за счет увеличения степени предварительного расширения  $\rho$  рабочего тела, что увеличивает площадь  $F$  индикаторной диаграммы (см. рис. 1), характеризующую энергетическую способность теплового цикла, однако при этом сокращается степень последующего расширения  $d$ , что уменьшает эффективность использования теплосодержания рабочего тела и снижает эффективный КПД двигателя.

Разумеется, увеличение  $p_z$  в общем повышает КПД двигателей за счет повышения степени сжатия, однако указанное выше нежелательное соотношение между мощностью и эффективным КПД остается неизменным.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Русинов, Р.В.** Двигатели автомобилей и тракторов [Текст] / Р.В. Русинов, Р.Ю. Добрецов. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. — С. 29, 120.

2. Теория ДВС [Текст]: учебник / Под ред. Н.Я. Дьяченко. — М.: Машиностроение, 1974. — С. 123.

3. **Русинов, Р.В.** Сравнительный анализ эффективности работы дизелей с газотурбинным и механическим

наддувом [Текст] / Р.В. Русинов, Р.Ю. Добрецов / Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия: Наука и образование. — 2010. № 4(110). — С. 112.

4. **Русинов, Р.В.** Агрегаты наддува двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Р.В. Русинов. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006. — С. 20.



# МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 669.15

*Н.Г. Разумов, А.А. Попович, А.О. Силин*

## ПОЛУЧЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КРИОГЕННЫХ АЗОТОСОДЕРЖАЩИХ ПОРОШКОВЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ С НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

Природный газ — один из важнейших видов энергетического сырья, который покрывает до 25 % мировой потребности в энергоресурсах. По прогнозу компании «Ocean Shipping Consultants» потребность в морских перевозках сжиженных природных газов (СПГ) в ближайшие 10–15 лет будет резко расти [1]. Основные потребители сжиженного природного газа — восточноазиатские (70 %) и европейские (26 %) страны.

Перевозки природного газа на судах целесообразны лишь в сжиженном виде, когда его объем уменьшается более чем в 600 раз [1]. Природный газ может переводиться в сжиженное состояние лишь при чрезвычайно низкой температуре  $-(162\text{--}163)^\circ\text{C}$ . Перевозка газа при температуре  $-163^\circ\text{C}$  предъявляет особые требования к конструктивному оформлению грузовых помещений и к применяемым для их изготовления материалам.

В настоящее время используются два типа грузовых танков-газовозов СПГ: вкладные сферические танки (система Kvaerner—Moss) и встроенные мембранные танки (система Gas Transport—Technigas).

Сферические танки обычно изготавливаются из алюминиевого сплава 5083 по американскому стандарту и покрываются сплошной монолитной изоляцией из пенополиуретана.

Мембранные грузовые танки — это емкости, образованные тонкой оболочкой, способной воспринимать только растягивающие напряжения и опирающейся на смежные корпусные конструкции [1]. Существуют мембранные грузовые танки двух типов: с гофрированными мембранами (тип «Gaz Transport and Technigaz»)

и с плоскостными мембранными (тип «Gas Transport»). Первые формируются из тонколистовой хромоникелевой стали марки SUS304L (по американскому стандарту). Вторые выполняются из сплава инвар (нержавеющая сталь с 36 %-ным содержанием никеля). Они практически не подвержены термическим деформациям в диапазоне температур, отвечающих условиям эксплуатации газовозов СПГ. Для изготовления сварных элементов аппаратов, емкостей, трубопроводов (обечайки, днища, патрубки, фланцы), деталей арматуры (штоки, клапаны, седла) и т. д. применяются хромоникелевые аустенитные стали [2]. Эти стали не чувствительны к эффектам старения во времени, и их ударная вязкость остается на высоком уровне даже после многолетней эксплуатации в условиях низких температур. К недостаткам этой группы сталей относятся низкая прочность при комнатной температуре, а также сравнительно высокая стоимость, обусловленная большим содержанием дорогостоящего никеля.

Высокая стоимость никеля привела к созданию сталей, в которых никель полностью или частично заменен марганцем, также служащим стабилизатором аустенита. В их состав обычно дополнительно вводят азот, способствующий получению аустенитной структуры и дополнительному упрочнению. Азот, образуя твердый раствор внедрения, существенно меняет параметры кристаллической решетки аустенита и тем самым влияет на характеристики прочности. Растворимость азота в  $\gamma$ -железе при температуре  $830^\circ\text{C}$  составляет всего лишь 0,027 % [3]. Присутствие хрома и особенно марганца способствует увеличению его растворимости в стали.



Повысящая стабильность аустенита, азот препятствует образованию  $\delta$ -феррита при высоких температурах. Введение азота в хромоникельмарганцевые стали позволяет более чем в полтора раза поднять уровень предела текучести при комнатной температуре. С понижением температуры эффективность влияния азота как элемента внедрения, блокирующего движение дислокаций, на величину предела текучести еще более возрастает. Хром, никель и марганец как элементы замещения оказывают меньшее влияние на прочностные свойства, их роль определяется необходимостью обеспечения заданной аустенитной структуры [3].

При введении в хромоникельмарганцевую сталь до 0,20 % азота предел ее текучести при 20 °C повышается на 50 %, а с понижением температуры увеличивается еще более интенсивно. С введением азота в сталь ее пластичность и вязкость несколько снижаются, но остаются на достаточно высоком уровне, характерном для аустенитных сталей.

Распространенные в настоящее время методы получения высокоазотистых аустенитных сталей (плавка под повышенным давлением азота или противодавлением аргона, плазмохимическое насыщение расплава) предполагают использование сложного оборудования. Кроме того, ввиду высоких температур, необходимых для плавления стали, практически неизбежно получение крупнозернистых материалов, обладающих низкими механическими свойствами. Поскольку зерно в аустенитных сталях не может быть измельчено термической обработкой, требуется многократная обработка давлением, что в конечном счете приводит к увеличению длительности технологического цикла, повышению расхода энергии и удорожанию материала.

В этой связи интенсивно изучаются проблемы уменьшения размера зерна высокоазотистых аустенитных сталей. Большое значение в выполнении данной задачи принадлежит технологии механического легирования [4–6]. По оценке некоторых авторов механохимические методы обработки материалов по своей энергонапряженности сравнимы с электронно-лучевой обработкой, а по воздействию на фазовые превращения — с ударно-волновой. Известно также, что механическое легирование является перспективным направлением получения наноструктуриро-

ванных материалов и широко применяется во многих развитых странах. Использование технологии механолегирования позволяет осуществить одновременное легирование железа аустенитообразующими элементами и азотом [6]. При этом возможно образование сплавов с нанокристаллической структурой и выделениями неравновесной фазы, размеры которой не превышают нескольких нанометров. В этой связи следует ожидать, что полученный компактный материал из данных порошков должен обладать комплексом высоких физико-механических свойств.

Однако, несмотря на кажущуюся простоту осуществления процессов механолегирования, вопросы взаимодействия азота с металлами и сплавами при механолегировании исследованы недостаточно. В большинстве случаев процессы механоактивации осуществляют в азоте в течение десятков часов. Атмосфера аммиака исследована только в единичных работах. Авторы проекта показали, что, в отличие от азота, использование аммиака позволяет на порядок сократить длительность технологического процесса механолегирования. Однако для окончательного решения вопроса об использовании той или иной атмосферы азотирования необходимы исследования, направленные как на термодинамическое моделирование процессов взаимодействия азотосодержащих сред с металлами при их совместной механоактивации, так и изучение кинетики данного процесса.

Целью нашей работы было изучение процесса фазообразования при механолегировании железа аустенитообразующими элементами в системе Fe-Cr-Ni-Mn-N в атмосфере аммиака.

Механическую активацию исследуемых порошков проводили в герметичном механореакторе высоконапряженной вибромельницы в среде аммиака по методике, описанной в работе [7]. Схема процесса механолегирования, применяемая в СПбГПУ, представлена на рис. 1. В качестве исходных компонентов использовали порошки железа (ПЖ-2М), хрома, электролитический никель и марганец с размером порошинок не более 200 мкм. Отношение массы загружаемого порошка к массе шаров составляет от 1:10 до 1:25. Время размола — от 1 до 5 часов.

На рис. 2 представлено изменение фазового состава в сплаве Fe-18Cr-8Ni-12Mn-N в зависи-

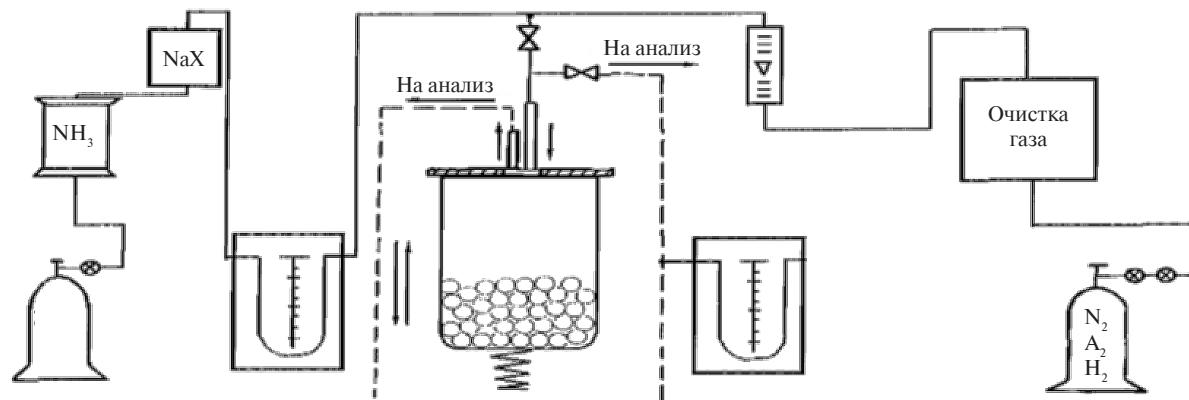


Рис. 1. Схема процесса механолегирования, применяемая в СПбГПУ

мости от времени механоактивации. Фазовый состав образцов определяли методом рентгенофазового анализа на дифрактометре Bruker D8 ADVANCE (Германия) в  $\text{CuK}\alpha$ -излучении по стандартной методике ( $U = 40$  кВ,  $I = 40$  мА). Из приведенного рисунка видно, что с увеличением времени механоактивации содержание  $\gamma$ -фазы растет. При этом ее доля в сплаве после 3,5 часов механоактивации достигает 90 %. При обработке полученной дифрактограммы с помощью программы EVA было установлено, что получаемый порошок имеет нанокристаллическую структуру, размеры которой находятся в диапазоне от 18 до 36 нм.

Дальнейшие исследования тонкой кристаллической структуры на высокоразрешающем просвечивающем электронном микроскопе Technai S-Twin G230 позволили получить более подробные данные о строении и размерах нанокристаллов в исследуемом сплаве. На рис. 3, *a*, *b* показана типичная нанокристаллическая структура механолегированного высокоазотистого порошкового сплава системы Fe-18Cr-8Ni-12Mn-0,9N. Видно, что размеры нанокристаллов находятся

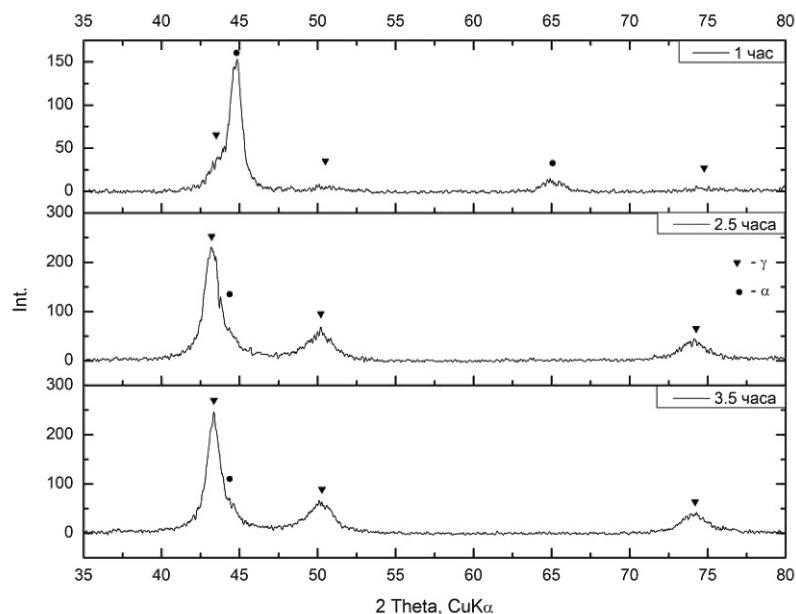
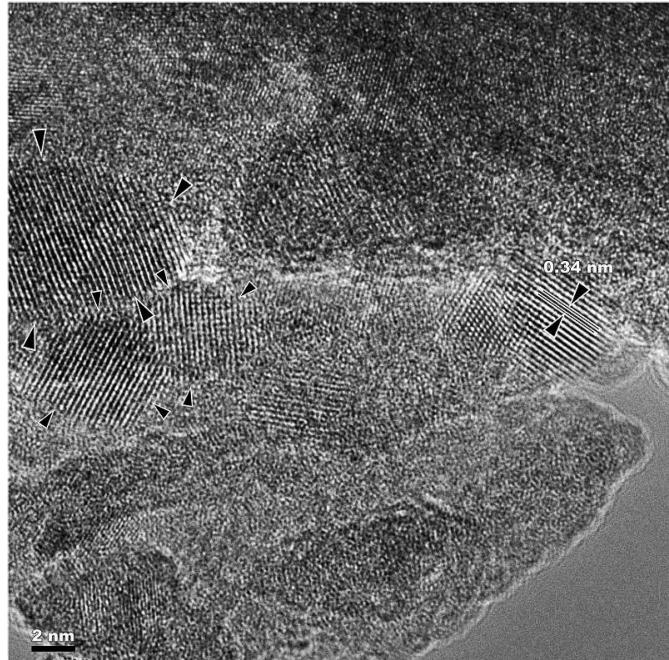


Рис. 2. Изменение фазового состава в сплаве Fe-18Cr-8Ni-12Mn-0,9N в зависимости от времени механоактивации



a)



б)

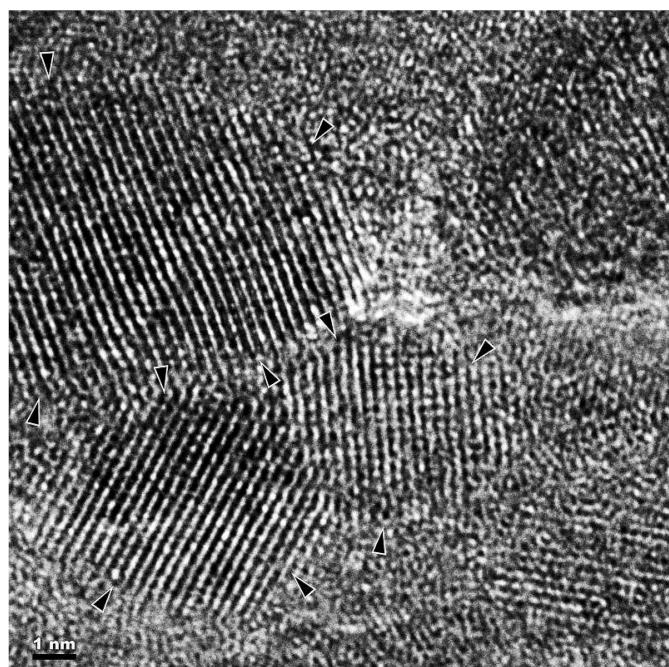


Рис. 3. Типичная нанокристаллическая структура механолегированного высокоазотистого порошкового сплава системы Fe-18Cr-8Ni-12Mn-0,9N



в диапазоне от 6 до 20 нм. Анализ изображения показал, что нанокристаллы имеют ГЦК-решетку. При изучении тонкой структуры при большом увеличении (рис. 3, б) можно увидеть, что на границах скопилось много дислокаций, а атомные плоскости частично когерентны.

В результате механического легирования в атмосфере аммиака из порошков железа, хрома, никеля и марганца были получены порошковые высоколегированные аустенитные сплавы с сверхравновесным содержанием азота и размером нанокристаллов аустенита 6–36 нм. При помощи механолегирования без дополнительного теплового воздействия удалось не только получить определенный состав порошкового сплава

с нанокристаллической структурой, но и добиться изменения типа кристаллической решетки (исходная ОЦК-решетка железа превратилась в ГЦК). Следовательно, механохимический метод может быть использован для получения порошковых высокоазотистых аустенитных сплавов с нанокристаллической структурой, которые могут применяться при создании криогенной техники, в частности при строительстве танков газовозов СПГ.

Работа выполнена в соответствии с государственными контрактами № П723 и № 16.740.11.0557 на выполнение научно-исследовательских работ для государственных нужд в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Логачёв, С.И.** Анализ основных элементов и характеристик современных судов для сжиженного природного газа (судов LNG) [Текст] / С.И. Логачёв // Морской вестник. — 2005, № 3 (15). С. 33–39.

2. **Солнцев, Ю.П.** Конструкционные стали и сплавы для низких температур [Текст] / Ю.П. Солнцев, Г.А. Степанов. — М.: Металлургия, 1985. — 271 с.

3. **Солнцев, Ю.П.** Специальные материалы в машиностроении [Текст] / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин, В.Ю. Пирайнен. — СПб.: Химиздат, 2004. — 640 с.

4. **Попович, А.А.** Механохимический метод получения порошков тугоплавких соединений [Текст] /

А.А. Попович, В.П. Рева, В.Н. Василенко // Порошковая металлургия. — 1993. № 2.

5. **Popovich, A.A.** Mechanisms governing tribochemical reduction of metals and non-metals from their oxides [Текст] / A.A. Popovich, V.P. Reva, V.N. Vasilenko // Alloys and Compounds. 1993. Vol. 190.

6. **Cisneros, M.M.** Processing of nanostructures high nitrogen stainless steel by mechanical alloying // Metallurgical and Materials Transactions. V 36A. May, 2005. — P. 1309–1316.

7. **Попович, А.А.** Механохимический синтез тугоплавких соединений [Текст] / А.А. Попович. — Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2003.

УДК 621.777.4

А.В. Глазков

## ТЕХНОЛОГИЯ ХОЛОДНОЙ ГИБКИ ТРУБ МЕТОДОМ ПРОДОЛЬНОГО РАСКАТАВИТИЯ

Интерес крупных промышленных предприятий к технологиям гибки труб неизменно растет. Специалисты, занимающиеся развитием производства в судостроении, энергетическом машиностроении, автомобилестроении, авиастроении, изучают виды гибки и принципы работы оборудования, проводят анализ технико-коммерческих предложений различных фирм. Наиболее высокие требования к изогнутому

трубопроводу предъявляют автомобильная и аэрокосмическая промышленности. Например, в 2010 году ОАО «Воткинский завод» на аукционе на поставку оборудования указал следующие требования: минимальный осевой радиус гиба  $R = 0,7$  ( $D$  — наружный диаметра трубы), овальность сечения (отклонение от круглости) — не более 2,5–3 % от  $D$ , отклонение геометрии трубы теоретического профиля — не более 1 мм.



Помимо этого, трубопроводы, применяемые в автомобильной (например, для системы выпуска отработанных газов — СВОГ) и в авиационной промышленности, обладают крайне сложной геометрией (используется множество радиусов гиба, зачастую отсутствуют прямолинейные участки между гибами) и используют сложные для деформации материалы, такие, как коррозионностойкая сталь, сплавы титана или жаропрочные стали. При этом не допускаются дефекты гибки: гофрообразование, следы на поверхности трубы, остающиеся от прижимов, утонения стенки. Для получения таких труб требуются новые эффективные технологии.

Способы холодной гибки труб, применяемые в современном производстве, следующие:

*Гибка в штампах.* Данный способ предназначается для гибки холодным методом водопроводных и газовых труб с диаметром до 90 мм. Пуансон в виде сегмента, повторяющего диаметр трубы, движется относительно матрицы в форме двух роликов, тем самым сгибает трубу между двух опор. Данный метод удобен и прост в обращении, но не позволяет выполнять качественную гибку трубы радиусом менее  $R = 7D$ . В современном производстве используются трубогибы типа РГУ [1].

*Гибка на валковых машинах.* Этот способ применяется в тех случаях, когда необходимо выполнить операции гибки труб диаметром до 320 мм, а также длинных труб с радиусом гиба  $R \geq 5D$ . Труба протягивается между тремя вращающимися роликами. В момент протягивания центральный ролик задавливает трубу между двумя остальными, тем самым сгибает ее. В современном производстве с данным методом используются станки типа СГ [1].

*Гибка труб методом наматывания.* Труба под действием крутящего момента наматывается на колодку — гибочный ролик. По данному методу осуществляют два типа гибки — бездорновый и дорновый.

Бездорновый вид гибки предназначен для холодной гибки без наполнителя (без дорна) стальных, медных, латунных и т. п. труб с радиусом гиба  $R \geq 3D$ . На производстве используются гибочные станки типа СТГ [1].

Дорновый вид гибки предназначен для холодной гибки с дорном стальных труб с радиусом гиба  $R \geq 1,5D$  и отношением толщины стен-

ки трубы к диаметру ( $s/d \geq 0,03$ ). Принцип действия заключается в следующем: трубу устанавливают в ручей гибочного ролика и закрепляют к прямолинейной его части при помощи поджима; устанавливают поджим, которым труба во время гибки прижимается к гибочному ролику. Приводимый во вращательное движение гибочный ролик увлекает за собой трубу, которая, находясь в ручье между гибочным роликом и поджимом, стаскивается с дорна и изгибается на необходимый угол и радиус. Данный метод применяется для гибки особо точных гнутых труб с тонкой стенкой и малым радиусом гиба. На производстве используются гибочные станки типа СГД [1].

Рассмотрим подробнее дорновый вид гибки методом наматывания. Для сохранения заданной круглой формы трубы применяют калибрующие дорны различной конструкции: сплошные, в виде стержня, составные — шаровые гибкие дорны [2].

Наибольшее распространение получили дорны из стержня, имеющего ложкообразную форму конца и шарообразную. Дорн с ложкообразной формой конца применяется для гибки труб диаметром до 75 мм с толщиной стенки 0,7–1,5 мм при радиусе гиба до  $R \geq D$ . Дорн с шарообразным концом имеет то преимущество, что на нем можно гнуть трубы, у которых гибы сопрягаются без прямолинейных участков, кроме того, он прост в изготовлении.

Когда при сплошном дорне овализация тонкостенных труб превосходит допустимую величину и образуются гофры, необходимо применять составной донр. У составных дорнов к сплошному дорну добавляют шарики или ролики со сферическими образующими, которые соединяют так, что дополнительные звенья могут размещаться по всему гибу (рис.1). Такие дорны поддерживают стенку трубы в месте изгиба и, кроме того, создают возможность при перемещении трубы по дорну придать ей круглую форму и даже произвести выравнивание неглубоких гофр. Дорн с шарообразным концом устанавливается с некоторым опережением относительно центра гибочного ролика. [2] Для гибки тонкостенных труб способом наматывания во избежание потери устойчивости стенок трубы устанавливается со стороны гибочного ролика складкоразглаживатель.

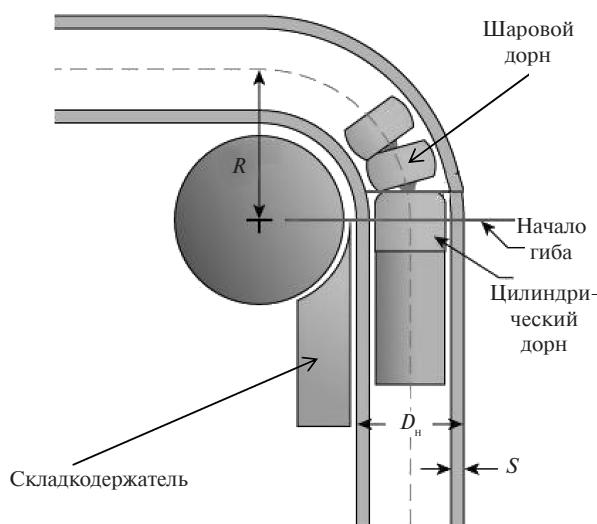


Рис. 1. Гибка труб методом наматывания с шаровым дорном

Складкоразглаживатель поддерживает внутреннюю часть гиба. В результате установки складкоразглаживателя та часть трубы, которая гнется, поддерживается со стороны как внутренней, так и внешней части гиба [3].

По экспериментальным данным при дорновой гибке методом наматывания труднодеформируемых труб из нержавеющих сталей с отношением  $s/d \leq 0,02$  и радиусом гиба  $R = 1,5D$  под действием возникающих сжимающих сил на внутренней части гиба образуются гофры, а в ряде случаев — складки; искажается проходное сечение трубы — появляются овальность и сплющивание; возникает потеря устойчивости трубы. При таких изменениях формы трубы увеличивается сопротивление движению прорезания и коррозии трубопроводов. Кроме того,

потеря устойчивости трубы приводит к ослаблению ее как несущей конструкции.

При использовании составных шаровых дорнов в зоне гиба из-за потери устойчивости стенки трубы образуются складки — гофры, тем самым часть металла заполняет пространство между шарами, образуются зарины, неровности и другие дефекты трубы. Путь устранения — это уменьшение зазора до минимума между гибким дорном и трубой в зоне гиба. Так как труба переходит из прямолинейного состояния в искривленно-радиусное, то инструменту — дорну — требуется придать возвратно-поступательное движение.

Для решения вышеуказанных проблем дорновой гибки труб методом наматывания была разработана новая технология: технология гибки труб методом продольного раскатывания. В зону гиба вводится раскатник. Для перекрытия свободных зон между дорном и трубой раскатнику придают возвратно-поступательное движение. Следовательно, зона работы раскатника должна превышать зону гиба на величину шага раскатных блоков. Раскатные блоки выполнены в виде роликов, при гибке трубы возникает дополнительное облегчение на вытягивание дорна из трубы. Зона напряженного состояния трубы во время гибки распространяется на  $45^\circ$  от начала гиба. Под действием сжимающих сил в зоне гиба труба обжимает гибкий раскатник, что приводит к колебанию стенки и образованию зоны пластического шарнира — облегчению процесса гибки и распределению металла. На прямолинейном участке для выравнивания трубы и облегчения деформирования стенки размещаем цилиндрический раскатник [4]. Цилиндрический раскатник путем возвратно-поступатель-

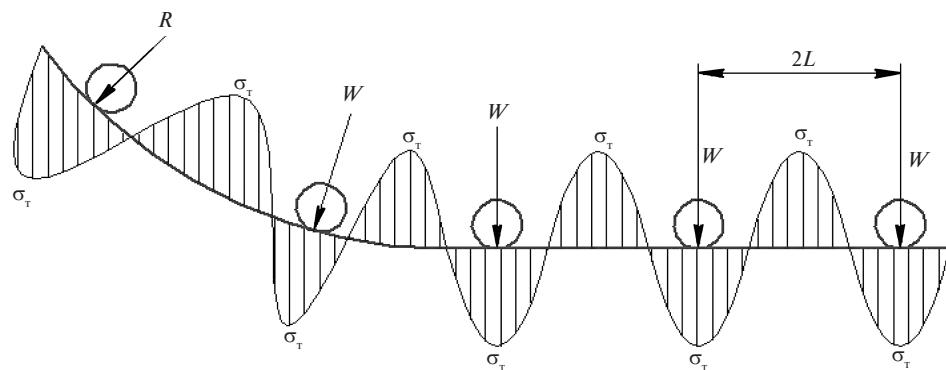


Рис. 2. Эпюра распределений напряжений стенки трубы под действием раскатника



Рис. 3. Общий вид технологии холодной гибки труб методом продольного раскатывания

ного движения и выбора определенного натяга [5] образует пластическая зона трубы — пластический шарнир. В точке приложения раскатывающего элемента под действием натяга возникает сосредоточенная нагрузка  $W$  (рис. 2). По эпюре распределения напряжений видно, что наибольшие значения возникают в точках касания раскатывающих элементов (точки  $C$ ) и точках прогиба стенки трубы ( $A$  и  $B$ ). Увеличение  $W$  приводит к появлению пластических деформаций в сечениях  $A$ ,  $B$ ,  $C$ . Когда материал становится пластическим, изгибные напряжения кратковременно достигают предела текучести по всей площади трех сечений, и прогибы стенки трубы увеличиваются, тем самым облегчая гибку трубы, но сохранив проходное сечение. В момент достижения предельной несущей способности мощность, с которой внешняя сила  $W$  совершает работу, если она движется с единичной скоростью, равна  $W \times 1$  (эта работа пластической деформации в шарнирах выделяется в виде теплоты). Скорость вращения каждого раскатывающего элемента  $1/L$ . Если  $M_p$  — момент, необходимый, чтобы во всем сечении появились пластические деформации (шарнир), то в точках  $A$  и  $B$  скорость рассеяния (диссиляции) энергии равна  $M_p/L$ , а в точке  $C$  — в два раза больше. Таким образом,  $W \times 1 = 4 M_p/L$  [7].

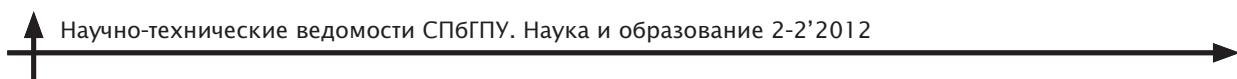
В дальнейшем потребуется провести пластический анализ гибки труб с упругими кольцевыми элементами.

Цилиндрическое раскатывание позволит повысить устойчивость стенки трубы в самом начале гиба и создать условие для распределения материала в зону гиба [6], а гибкий раскатник, заходя в пластическую зону, удерживает стенку по всей длине зоны гиба трубы. Возвратно-поступательное движение имеет рабочий ход, равный двойному шагу раскатных блоков. Общий вид технологии представлен на рис.3. Во время раскатывания будет образовываться наклеп, выглаживание, а тем самым — упрочнение и повышение качества внутренней поверхности трубы.

При соблюдении предложенной технологии появляется возможность гибки тонкостенных труднодеформируемых труб из нержавеющих сталей с отношением  $s/d \leq 0,02$  и радиусом гиба  $R \leq 1,5D$ , а также гибки труб с внутренним покрытием. Геометрия полученных гнутых труб отвечает высокому качеству — овальность гнутого участка менее 6 % по ОСТ 24.125.03—89. Использование данного метода позволит получить высокоточные трубопроводы. Такой метод будет широко использован в нефтехимической промышленности, судостроении и т. д.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электронный ресурс: <http://technomash.megasklad.ru>.
2. Матвеев, А.Д. Ковка и штамповка. Т. 4. [Текст] / А.Д. Матвеев.— М., 1987.— 544 с.
3. Электронный ресурс: <http://www.tubend.ru/theory/132/>
4. Патент 2 397 835 РФ, МПК B21D 9/14. Способ холодной гибки труб [Текст] / А.В. Глазков.— За-



явка № 2008145769/02.— от 18.11.2008.— Опубл. 27.08.2010.— Бюл. № 24.

5. **Козлов, А.В.** Определение предельных натягов и усилий при гибке труб методом раскатывания [Текст] / А.В. Козлов, Я.М. Хилькевич // Известия Челябинского научного центра.— 2004.— С. 101–106.

6. **Глазков, А.В.** Холодная гибка труб продольным раскатыванием [Текст] / А.В. Глазков, С.Г. Лакирев // СТИН.— 2005. № 7.

7. **Джонсон, У.** Теория пластичности для инженеров [Текст] / У. Джонсон, П.Б. Меллор.— М.: Машиностроение, 1979.— 567 с.

УДК 630

*С.А. Котов, В.А. Марков,  
А.Н. Марков, А.А. Мальцев*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ ПК40Х2 НАНЕСЕННОГО МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО ПРИПЕКАНИЯ

Многие детали ходовой части лесозаготовительных машин, особенно подшипники скольжения и оси, подвержены сильному износу, связанному с тяжелыми условиями эксплуатации техники. Подшипники зачастую дешевле заменить, чем восстанавливать, а вот оси могут быть достаточно дорогими. Причиной изнашиваемости осей ходовой части лесозаготовительной техники служит попадание абразива на трикотажный контакт. Трение — одно из самых распространенных явлений. Оно сопровождает любые относительные перемещения соприкасающихся тел или их частей. В качестве представительной детали для исследования скорости изнашивания выбрана ось катка трелевочного трактора Онежец-300 (рис. 1).



Рис. 1. Оси катка трелевочного трактора

Для восстановления осей катка тракторов предлагается метод электроконтактного припекания композиционных материалов, позволяющий повысить их долговечность и одновременно упрочнить рабочие поверхности. Также следует учесть тот факт, что внедрение установки для электроконтактного припекания возможно на большинстве предприятий отрасли и не требует крупных финансовых вложений.

Статья посвящена проведенному исследованию скорости изнашивания восстановленных по данной технологии деталей в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации данной детали. При этом особое внимание уделяется анализу влияния различных параметров технологического процесса припекания (сила тока, напряжение и сила прижима электрода) на износостойкость восстановленной детали.

### Методика исследования

Технологическая схема электроконтактного напекания металлических порошков на поверхности деталей показана на рис. 2. Данная схема предназначена для восстановления цилиндрических деталей. Здесь ток в зону наплавки подводится через два наплавляющих ролика. Это позволяет исключить из внешнего контура контактные переходы и тем самым значительно уменьшить потери мощности.

Сущность технологического процесса электроконтактной наплавки заключается в спека-



ния и припекании к поверхности детали слоя металлического порошка под действием давления формирующего ролика и температуры от проходящего по слою порошка электрического тока большой плотности ( $3000-5000 \text{ A/cm}^2$ ), т. е. спекание происходит за счет тепла, выделяемого электрическим током на активном сопротивлении [3].

Внешним называется трение, которое возникает при относительном перемещении двух соприкасающихся тел. Оно зависит от взаимодействия внешних поверхностей этих тел вблизи участков касания и не зависит от состояния внутренних частей тела. Процесс внешнего трения и износа состоит из трех последовательных этапов: взаимодействия поверхностей, изменения материала поверхностных слоев в процессе трения и разрушения поверхностей [1]. В рассматриваемом случае (ось катка) трение происходит с более твердой деталью — подшипником, изготовленным из стали ШХ15 (беспримесной подшипниковой стали). Поверхность твердых тел характеризуется микрорельефом, показателями которого являются отклонение формы, волнистость и шероховатость. Можно сделать вывод, что изменение структуры при трении происходит на отдельных пятнах контакта. Поэтому структура и свойства поверхностного слоя отличается от структуры и свойств, характерных для условий объемной деформации и термической обработки.

В рассматриваемом случае согласно заводским чертежам деталей шероховатости  $Ra$  обеих поверхностей трения равны  $2,5$ , что снижает воздействие этого фактора до минимума. При рассмотрении процесса внешнего трения необходимо учитывать три группы факторов (см. табл.) [1].

При выборе подходящего порошкового материала, который возможно использовать при нанесении покрытий методом электроконтактной наплавки, следует учесть физико-механические и эксплуатационные свойства получаемых из них покрытий и сопоставить их со свойствами исходного материала, в данном случае — стали 40Х.

Также стоит обратить внимание на то, что выбор материала должен быть сопоставлен с областью его применения. Для выбора порошкового материала воспользуемся классификацией,

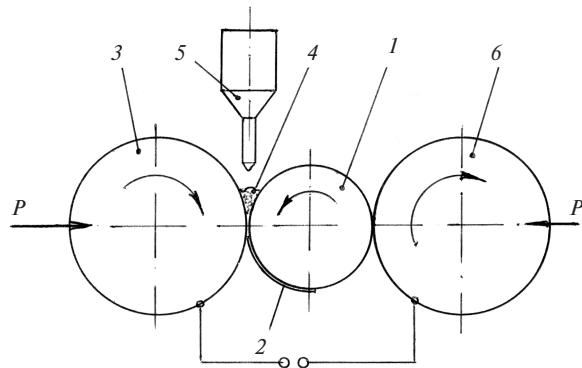


Рис. 2. Технологическая схема электроконтактной наплавки порошковыми материалами:  
1 — восстанавливаемая деталь; 2 — наплавленный металл; 3 — наплавляющий ролик; 4 — металлический порошок; 5 — бункер; 6 — упрочняющий ролик

предложенной профессором Б.С. Ермаковым. Исходя из физико-механических свойств и состава установлено, что наиболее предпочтительно для высоконагруженных соединений ходовой части лесных машин покрытие ПК40Х2. Основой данного композиционного материала служит железо, а в его состав также входит углерод ( $0,3-0,6 \%$ ) и хром ( $1-3 \%$ ).

Для воссоздания естественных условий трения используется установка ДМ-15 (динамическая машина с максимальной силой нагружения испытуемого соединения 15 кН).

Данная установка позволяет воссоздавать абразивное изнашивание внедрением в зону контакта деталей абразивных элементов, таких, как песок, грунт и др. В качестве пары трения используется реальное соединение «ось катка — внутренняя обойма подшипника». Перед испытанием производится смазывание обоих деталей пластичным смазочным материалом УНИОЛ-1 (ГОСТ 1033-79).

В местах измерений производилась маркировка деталей. Сопряженные диаметры изменились после разборки электронным микрометром и нутрометром с точностью до  $0,001 \text{ mm}$  в двух взаимоперпендикулярных плоскостях и в трех точках, в центре и по краям, а значение износа принималось как среднее между ними.

Нагрузка на сопрягаемые детали принимается исходя из реальной  $P = 15000 \text{ N}$ , устанавливаемой динамометром ДОСМ-5-1 (ТУ25.06.629-

**Факторы, влияющие на внешнее трение твердых тел**

Входные факторы	Внутренние факторы	Выходные факторы
Природа трущихся тел Смазочный материал Нагрузка Скорость Температура	Изменение шероховатости Изменение свойств поверхностных пленок Тепловыделение Изменение структуры Изменение механических свойств	Сила трения Интенсивность износа

74). Также соблюдены следующие условия: характер движения — вращательный; максимальная скорость скольжения в паре трения  $V_{\max} = 0,07$  м/с при выходной частоте вращения вала  $n = 30$  мин<sup>-1</sup>, передаваемого ему электродвигателем установки. Перед проведением экспериментов для каждой пары трения производилась приработка при нагрузке  $P = 5000$  Н и скорости  $V = 0,01$  м/с. В ходе проведения исследования производилось измерение температуры в зоне трения с помощью термометра, установленного в отверстие, сделанное в обойме подшипника.

Для оценки скорости изнашивания приняты следующие зависимости [4]:

$$I_{\text{из}} = \frac{U}{t}, \quad (1)$$

$$I_{\text{из}} = I_{\text{оси}} + I_{\text{под}}, \quad (2)$$

где  $U$  — износ сопрягаемых деталей, мм;  $t$  — время работы установки, час;  $I_{\text{из}}$  — суммарная скорость изнашивания сопряжения, мм/час;  $I_{\text{оси}}$  — скорость изнашивания оси, мм/час;  $I_{\text{под}}$  — скорость изнашивания подшипника, мм/час.

За номинальную скорость изнашивания ( $I_{\text{ном}}$ ) примем изнашиваемость оси катка без покрытия. В ходе проведения предварительных исследований было установлено, что  $I_{\text{ном}} = 0,014$  мм/час. При исследовании номинальной интенсивности изнашивания опыты проводились в тех же условиях, что и при исследовании износостойкости осей с покрытием [5].

В качестве факторов технологического процесса прилегания композиционных материалов, влияющих на интенсивность изнашивания, были выбраны следующие: сила тока  $I$ , напряжение  $U$  и сила прижима электрода  $P$ .

В ходе проведения регрессионного анализа было получено следующее уравнение [2]:

$$Y = -33,85 - 1,97X_1 - 1,43X_2 - 0,47X_3 - 0,47X_1X_2, \quad (3)$$

где  $Y$  — скорость изнашивания;  $X_1$  — сила тока;  $X_2$  — напряжение;  $X_3$  — усилие прижима электрода.

При проверке адекватности модели рассчитаны следующие показатели:

дисперсия адекватности

$$S_{\text{ад}}^2 = 2/(8-5)0,022 = 0,0147;$$

критерий Фишера

$$F = S_{\text{ад}}^2 / S_y^2 = 0,12 / 0,00726 = 16,5.$$

Находим по таблице  $F_{\text{кр}} = 19,37 > 16,5$ ; это означает, что модель адекватна.

**Результаты исследования**

После перехода к натуральным величинам и потенцирования уравнения получаем

$$I_{\text{из}} = 0,0455 - 0,00175I - 0,0025U - 0,00175P. \quad (4)$$

Из этого можно судить, что все факторы технологического процесса являются значимыми.

Так как зависимость линейная и не имеет точек экстремума, ограничения вводятся исходя из технических возможностей оборудования.

На основе анализа результатов экспериментов и возможностей технологического оборудования получены следующие значения параметров технологического процесса:  $I = 14$  кА,  $U = 4$  В и  $P = 0,5$  кН при  $I_{\text{из}} = 0,009$  мм/час.

Учитывая, что  $I_{\text{ном}} = 0,014$  мм/час, определим процентное снижение скорости изнашивания относительно новых деталей без покрытия:

$$K_{\text{ии}} = \left( 1 - \frac{I_{\text{экс}}}{I_{\text{ном}}} \right) 100\% = \left( 1 - \frac{0,009}{0,014} \right) 100\% = 36\%. \quad (5)$$



Анализируя результаты исследования, можно сделать вывод, что скорость изнашивания покрытия, полученного методом электроконтактного припекания композиционных материалов, на 36 % меньше, чем скорость изнашивания стали 40Х, из которой изготовлена представительная

деталь — ось катка. Соответственно можно предположить, что долговечность и надежность соединений, изготовленных или восстановленных с помощью композиционных материалов, выше, чем у стандартных соединений ходовой части лесозаготовительных машин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов, С.А. Трение в подвижных соединениях [Текст] / С.А. Герасимов // Наука и образование.— 2004.— № 3.— С. 34–42.
2. Зубарев, Ю.М. Применение методов теории планирования многофакторных экспериментов в технологии машиностроения [Текст] / Ю.М. Зубарев.— СПб.: Изд-во ОП ПИМаш, 2000.— 130 с.
3. Клименко, Ю.В. Электроконтактная наплавка [Текст] / Ю.В. Клименко.— М.: Металлургия, 1978.— 127 с.
4. Пекарев, А.Р. Восстановление подвижных соединений [Текст] / А.Р. Пекарев, А.А.Пекарев.— Чебоксары: Изд-во СервисМаш, 1985.— 80 с.
5. Анисимов, Г.М. Основные направления повышения эксплуатационной эффективности гусеничных трелевочных тракторов [Текст] / Г.М. Анисимов.— СПб., 2007.— 456 с.

УДК 621.357

*Е.Н. Волкова, А.И. Демидов*

## ПОЛУЧЕНИЕ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИ ЧИСТОГО МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ГЕКСАГИДРАТА СУЛЬФАТА НИКЕЛЯ

В связи с истощением природных ресурсов на рынке производства и потребления цветных металлов все большая доля в сырьевой базе отдается вторичному сырью. Практический интерес представляют переработка и повторное использование объектов, содержащих опасные для человека и окружающей среды тяжелые металлы и их соединения. Как правило, данные материалы представляют собой комплекс химических соединений, не встречающихся совместно в естественной среде, что требует разработки и освоения новых технологий. Отработанные щелочные аккумуляторы, основные компоненты которых — весьма ценные, но токсичные соединения никеля, кадмия и меди, в полной мере относятся к таким видам техногенных отходов.

Основным источником вторичного никеля служат оксидно-никелевые электроды (ОНЭ), в активной массе (АМ) которых содержание никеля колеблется в интервале от 38,7 до 39,1 масс. % [1].

Основное преимущество гидрометаллургической технологии переработки АМ ОНЭ от-

работанных щелочных аккумуляторов связано с возможностью оптимизации технологического процесса в плане получения комплекса соединений никеля и других элементов.

В системе  $\text{NiSO}_4 \text{-- H}_2\text{O}$  при температурах от 269,6 до 363 К существует ряд кристаллогидратов различной степени водности. Согласно литературным данным [2] стабильными фазами являются: моренозит  $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (ромбический); ретгерсит  $\alpha\text{-NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (тетрагональный); никельгексагидрат  $\beta\text{-NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (моноclinный);  $\text{NiSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NiSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . А метастабильные фазы — это  $\text{NiSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , где  $n = 3\text{--}5$ .

Кристаллизация сульфата никеля из растворов, содержащих серную кислоту, т. е. в системе  $\text{NiSO}_4 \text{-- H}_2\text{SO}_4 \text{-- H}_2\text{O}$ , исследовалась при температурах 283–353 К [3–6].

### Экспериментальная часть

В качестве объекта переработки была взята АМ ОНЭ отработанного никель-железного аккумулятора (НЖА) марки ТНЖ-250-У2. Предложенный авторами способ гидрометал-



лургической переработки АМ ОНЭ включает следующие технологические этапы [7]:

1. Выщелачивание никеля из АМ ОНЭ. Получение графита.
2. Получение сульфата никеля.
3. Получение двойной соли никеля.
4. Получение гидроксида никеля (II).
5. Получение сульфата натрия.

В ходе первого этапа выщелачивание АМ ОНЭ отработанного НЖА проводилось в избытке 30 %-й серной кислоты с целью получения конечных продуктов реактивной чистоты [8]. Кислоту добавляли к сухой АМ порционно, температура в ходе процесса поддерживалась в интервале 75–80 °С. Общее время протекания процесса составляло 1 час.

После окончания выщелачивания углерод, содержащийся в АМ ОНЭ, отделяли от раствора фильтрованием при повышенных температурах. Количественное содержание никеля в растворе сернокислотного выщелачивания определяли комплексонометрическим методом; средняя степень извлечения никеля в раствор лежит в интервале 97–99 %.

На втором этапе полученный раствор медленно охлаждали до температуры окружающей среды в открытом кристаллизаторе и выдерживали в течение 3–6 суток.

В ходе охлаждения создавалось пересыщение раствора, достаточное для образования и роста кристаллов как за счет понижения температуры

до 293 К, так и за счет увеличения концентрации раствора в процессе испарения растворителя (ниспадающая ветвь кривых изотерм растворимости сульфата никеля в присутствии серной кислоты на рис. 1).

Повышение концентрации серной кислоты в ходе кристаллизации позволяет уменьшить содержание сульфата никеля в растворе и за счет этого увеличить выход продукта. Кроме того, в растворе создается сильно кислая среда ( $pH = 1-1,5$ ), что препятствует соосаждению примесей. Оставшийся маточный раствор направляли на получение двойной соли никеля (этап 3).

В результате кристаллизации были получены монокристаллы состава  $\text{NiSO}_4(\text{H}_2\text{O})_6$  различной степени крупности максимальным размером 7 мм. Анализ фазового состава кристаллического сульфата никеля проводили на дифрактометре STADI-P с использованием позиционно чувствительного детектора мини-PSD (STOE, Германия) при двух геометриях съемки: пропускания ( $K_{\text{Cu}\alpha_1}$ ) и с фокусировкой согласно Брегг-Брентано ( $K_{\text{Cu}\alpha_1+\alpha_2}$ ). Съемку проводили при углах  $2\theta$  в диапазоне 5–80° с шагом 0,02° и временем накопления 10 секунд на точку. На рентгенограмме, снятой с фокусировкой по Брегг-Брентано (рис. 2), наблюдается значительное увеличение интенсивности отражения от плоскости (004), обусловленное преобладающей ориентацией (текстурой).

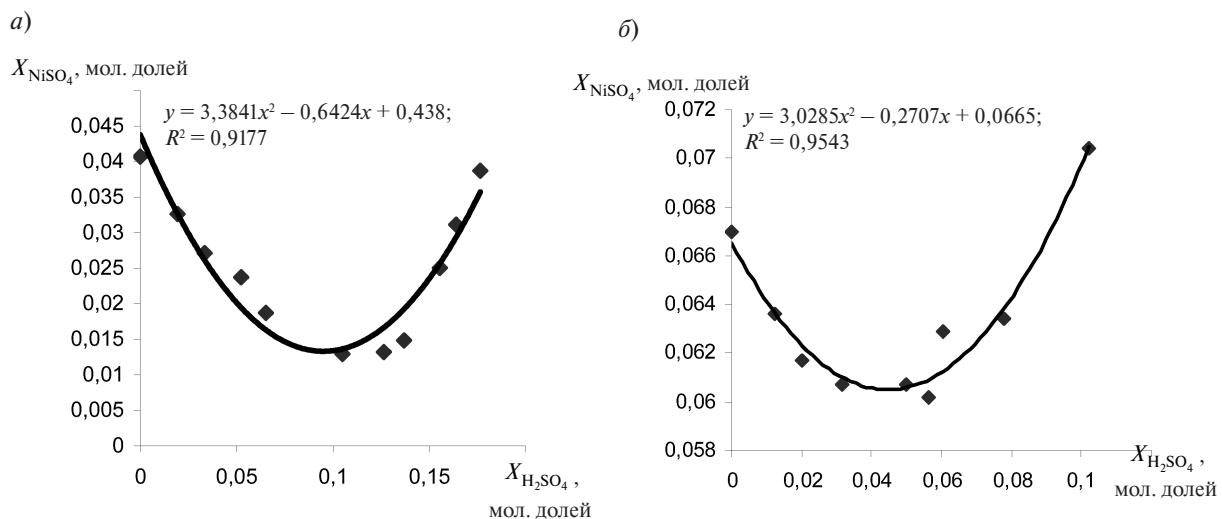


Рис. 1. Зависимость растворимости сульфата никеля от концентрации серной кислоты в пересчете на молярные доли (а — при  $T = 293$  К; б — при  $T = 343$  К)

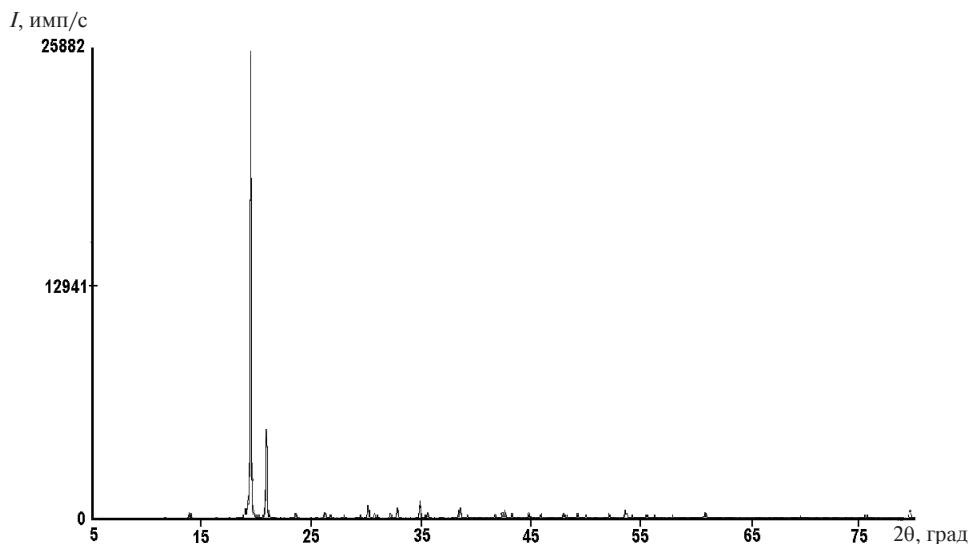


Рис. 2. Дифрактограмма монокристалла  $\text{NiSO}_4\text{(H}_2\text{O)}_6$ , снятая с фокусировкой по Брегг-Брентано ( $K_{\text{Cu}\alpha_1+\alpha_2}$ )

Анализ дифрактограмм (рис. 2, 3), полученных в результате съемки в этих двух геометриях, позволяет рассчитать кристаллографические параметры изучаемого вещества, а также сделать вывод о наличии примесных фаз.

### Результаты и обсуждение

Согласно результатам рентгенофазового анализа (РФА) полученные при переработке АМ ОНЭ отработанного НЖА монокристаллы

представляют собой  $\alpha$ -гексагидрат сульфата никеля (ретгерсит) с тетрагональной кристаллической решеткой. Значения кристаллографических параметров, рассчитанных по данным РФА, приведены в таблице. Средние значения кристаллографических параметров АМ ОНЭ при переработке отработанных никель-железных аккумуляторов, определенные при двух геометриях съемки, составляют соответственно в  $\text{\AA}$ :  $a = (6,7836 \pm 0,0005)$  и  $c = (18,2820 \pm 0,0022)$

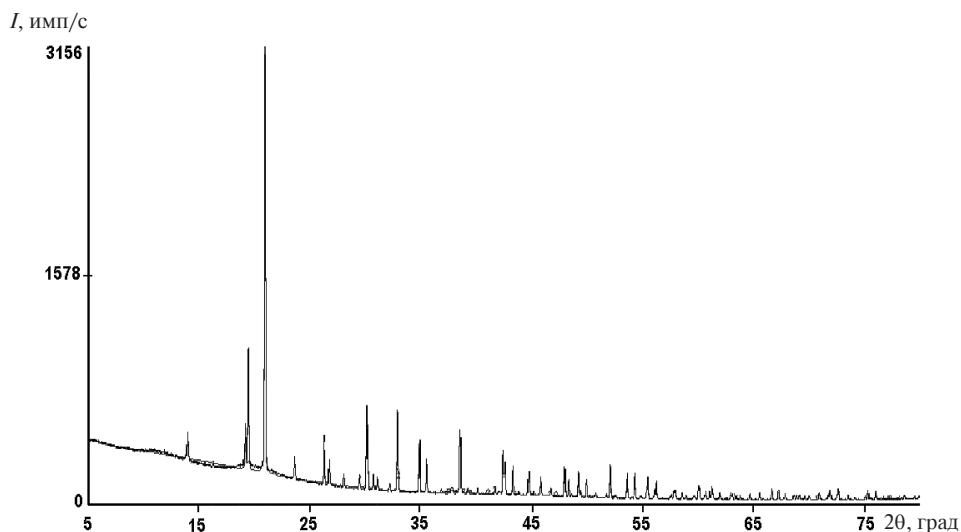


Рис. 3. Дифрактограмма монокристалла  $\text{NiSO}_4\text{(H}_2\text{O)}_6$ , полученная при пропускании рентгеновского излучения ( $K_{\text{Cu}\alpha_1}$ )

**Кристаллографические параметры монокристаллов  $\alpha$ - $\text{NiSO}_4(\text{H}_2\text{O})_6$ ,  
полученных в ходе гидрометаллургической переработки АМ ОНЭ отработанных НЖА**

Номер опыта	Полученные съемкой					
	при пропускании			с фокусировкой по Брег-Брентано		
	$a, \text{\AA}$	$c, \text{\AA}$	$V, \text{\AA}^3$	$a, \text{\AA}$	$c, \text{\AA}$	$V, \text{\AA}^3$
1	6,782	18,281	842,90	6,783	18,26	841,00
2	6,784	18,288	842,90	6,792	18,29	841,70
3	6,784	18,278	843,60	6,794	18,27	843,80
4	6,783	18,279	842,90	6,794	18,31	841,00
5	6,783	18,280	841,00	6,799	18,32	844,90
6	6,784	18,283	840,90	6,801	18,31	841,50
7	6,783	18,282	842,90	6,793	18,29	840,90
8	6,783	18,279	841,20	6,798	18,29	843,90
9	6,784	18,282	842,90	6,796	18,29	841,40
10	6,785	18,286	842,90	6,795	18,29	841,00
11	6,783	18,278	841,70	6,796	18,28	844,40



Рис. 4. Перспективы использования гексагидрата сульфата никеля, полученного в результате гидрометаллургической переработки АМ ОНЭ отработанных щелочных аккумуляторов



(пропускание);  $a = (6,7950 \pm 0,0032)$  и  $c = (18,2919 \pm 0,0118)$  (с фокусировкой по Брег-Брентано). Результаты, полученные в результате съемки дифрактограмм различными методами, хорошо согласуются между собой.

Параметры кристаллической решетки ретгерсита  $[\alpha\text{-NiSO}_4(\text{H}_2\text{O})_6]$ , известные из публикаций [9], составляют  $a = 6,785(2)$  Å и  $c = 18,288$  [3] Å, что хорошо согласуется с данными, полученными нами экспериментально.

Сравнение теоретически рассчитанных дифрактограмм с экспериментальными позволяет сделать однозначный вывод: полученный нами кристаллический  $\alpha\text{-NiSO}_4(\text{H}_2\text{O})_6$  является однозначным и рентгенографически чистым.

Кроме того, результаты инфракрасной спектроскопии полученного в ходе второго этапа гидрометаллургической переработки АМ ОНЭ гексагидрата сульфата никеля свидетельствуют об отсутствии в его составе органических примесей. Перспективы использования полученного сульфата приведены на рис. 4.

В ходе гидрометаллургической переработки активной массы оксидно-никелевых электродов отработанных щелочных аккумуляторов кристаллизации из раствора, содержащего серную кислоту, получен рентгенографически чистый монокристаллический  $\alpha$ -гексагидрат сульфата никеля (ретгерсит), свободный от органических примесей.

Кристаллографические параметры  $\alpha$ -гексагидрата сульфата никеля (ретгерсит), определенные методом рентгенографического анализа при двух геометриях съемки, составляют в Å соответственно:  $a = (6,7836 \pm 0,0005)$  и  $c = (18,2820 \pm 0,0022)$  при съемке пропусканием;  $a = (6,7950 \pm 0,0032)$  и  $c = (18,2919 \pm 0,0118)$  при съемке с фокусировкой по Брег-Брентано.

Авторы выражают благодарность кандидату физико-математических наук А.П. Тютюннику (Институт химии твердого тела УрО РАН) за помощь в проведении рентгенографического исследования монокристаллов шестиводного сульфата никеля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волкова, Е.Н. Определение никеля в активной массе оксидно-никелевого электрода никель-железного аккумулятора [Текст] / Е.Н. Волкова, А.И. Демидов // Фундаментальные исследования в технических университетах.— М., 2008.— С. 246–247.
2. Соболева, Л.В. Выращивание монокристаллов  $\alpha$ -сульфата никеля гексагидрата,  $\alpha\text{-NiSO}_4\text{-6H}_2\text{O}$  [Текст] / Л.В. Соболева, Е.Б. Руднева, И.Л. Смольский // Кристаллография.— 1998.— Т. 43. № 4.— С. 756–760.
3. Гирич, Т.Е. Система  $\text{NiSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$  при 10 и 20 °C [Текст] / Т. Е. Гирич, Р.И. Брагинская, А.К. Бучинский, С.И. Резниченко // Журнал неорганической химии.— 1986. Т. 31, вып. 6.— С. 1575–1577.
4. Кудряшов, Е.Ю. Растворимость в системе  $\text{NiSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$  при 283, 293 и 313 К [Текст] / Е.Ю. Кудряшов, А.Е. Лебедев // Журнал прикладной химии.— 1989. Т. 62. № 3.— С. 700–702.
5. Гирич, Т.Е. Растворимость в системе  $\text{NiSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$  при 333, 343 и 353 К [Текст] / Т.Е. Гирич, А.К. Бучинский // Журнал прикладной химии.— 1986.— Т. 59. № 4.— С. 884–886.
6. Гирич, Т.Е. Исследование системы  $\text{NiSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$  при 30, 40 и 50 °C [Текст] / Т.Е. Гирич, А.К. Бучинский // Журнал прикладной химии.— 1989. Т. 62. № 3.— С. 700–702.
7. Пат. 2410801 Российская Федерация, С1 Н01М10/54. Способ переработки оксидно-никелевых электродов [Текст] / Демидов А.И., Волкова Е.Н.; заявитель и патентообладатель — ГОУ высшего и профессионального образования «СПбГПУ».— № 2010101453/07; заявл. 18.01.2010; опубл. 27.01.2011.— 8 с.
8. Пат. 2051106 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> C01G53/10, 2051106 С1. Способ выделения сульфата никеля из раствора [Текст] / Пашковский А.А., Рогов П.В., Чернов А.И [и др.]; заявитель и патентообладатель — Комбинат «Южуралникель».— № 5064764/26; заявл. 9.10.1992; опубл. 27.12.1995, Бюл. № 15.— 3 с.: ил.
9. Исхакова, Л.Д. Кристаллическое строение, расчет параметров потенциала межатомного взаимодействия (ППМВ) и термохимических свойств  $\text{NiSO}_4\text{-nH}_2\text{O}$  ( $n = 7, 6$ ) [Текст] / Л.Д. Исхакова, Л.С. Дубровинский, И.А. Чарушникова // Кристаллография.— 1991. Т. 36.— Вып. 3. С. 650–655.

УДК 621.9.048.7

*М.В. Карасёв, Д.Н. Работинский, Л.Г. Черкасова,  
К.А. Павлов, А.Е. Беляев, Н.А. Стешенкова*

## **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ ДЛЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО СУДОСТРОЕНИЯ**

В СССР и России на предприятиях судостроения в качестве источников питания для дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах традиционно применяется гамма различного сварочного оборудования.

В современной России существует огромный выбор различного сварочного оборудования для дуговой сварки, но никто за последние годы не подвергал типы этого оборудования системному анализу на предмет применимости в типовых технологических процессах на судостроительных предприятиях. В настоящей статье предлагается классифицировать применяемое сварочное оборудование, разделив ее на шесть условных групп, и на основе этой классификации определить дальнейшие пути применения каждой из групп в отечественном судостроении. Работа весьма актуальна и представляет интерес для технологов предприятий судостроения, которым принимать решения по обоснованному применения различных установок для сварки плавящимся электродом в защитных газах.

Одним из первых и самым популярным сварочным выпрямителем тиристорного типа в России был ВДУ-506. Он применялся, как правило, с механизмом подачи сварочной проволоки ранцевого типа «Гранит». Разработан во ВНИИЭСО в 80-е годы. Выпрямитель ВДУ-506 был разработан исходя из идеологии сварки в защитных газах, наиболее распространенной в те годы. Так как в основном использовалась сварочная проволока типа Св-08Г2С диаметром 2,0 мм, а в качестве защитного газа применялся углекислый газ, то конструкция сварочного выпрямителя была рассчитана на большой сварочный ток (более 400 А) и имела регулируемый дроссель, который изменял свою индуктивность в зависимости от стадии каплепереноса электрод-

ного металла (наиболее эффективной была регулировка дросселя на токах до 100 А).

Установка ВДУ-506 была целевой, предназначенной для сварки на больших токах дуги и диаметрах сварочной проволоки, поэтому динамические свойства этого выпрямителя невысоки, и в конце 90-х годов, когда проявилась тенденция к снижению сварочного тока и уменьшению диаметра сварочной проволоки, а также к использованию смесей газов при сварке, применение их стало ограниченным.

На ОАО «Сэлма» аналогичные установки выпускаются до сих пор под названием ВДУ-506С. Импортный аналог — выпрямитель LAW-520 фирмы «ESAB», Швеция.

Примерно в эти же годы в промышленности активно применялся сварочный выпрямитель типа ВС-632 для механизированной сварки разработки ИЭС им. Е. Патона. В судостроительной промышленности применение этого типа выпрямителя было ограниченным, так как рабочий ток дуги был еще выше, чем у выпрямителя ВДУ-506. Выпрямитель был выполнен конструктивно очень просто. Регулировка тока дуги осуществлялась за счет ступенчатого изменения напряжения. Дроссель был неуправляемый, поэтому каждый тип такого выпрямителя для получения оптимальных сварочных свойств был рассчитан на определенный диапазон тока дуги.

С учетом опыта использования выпрямителей ВС-632 впоследствии была разработана гамма сварочных выпрямителей со ступенчатой регулировкой тока дуги, таких, как Kempoweld (Финляндия), Esabmig (Швеция), Variostar (Австрия), ВС-300, 4020, 600, ИТС (Россия) и выпрямители многих других фирм.

Высокие сварочные свойства этих выпрямителей достигаются за счет тщательно подобранных индуктивностей трансформатора и дроссе-



ля в определенном диапазоне сварочного тока. Эти сварочные установки вместе с подающими механизмами ранцевого типа («Адмиралтеец», ПДГ-322 и др.) до сих пор широко используются в российском судостроении на таких предприятиях, как «Адмиралтейские верфи» (Санкт-Петербург), ЦСС «Звездочка» (Северодвинск) и многих других. Основной диаметр сварочной проволоки составляет 1,2 мм, ток дуги — не более 300 А. Их главными положительными чертами являются высокая ремонтопригодность и простота в обслуживании. Недостаток — высокие требования к точности поддержания сварочного режима. В последнее время появились сварочные установки такого типа с элементами синергетики (ВС-450 и др.).

В конце 90-х годов на предприятиях судостроения стали активно применяться универсальные тиристорные сварочные выпрямители типа ВД-506ДК и ВДУ-511, разработанные в ЗАО НПФ «ИТС». Ближайший импортный аналог — тиристорный сварочный выпрямитель типа DC-400 (IDEALARC) фирмы «Lincoln Electric» (США). Конструктивной особенностью этих сварочных установок является использование дополнительного маломощного источника питания (дополнительный дроссель у ВД-506ДК или батарея конденсаторов у ВДУ-511), которые разряжаются на дуговой промежуток в момент его замыкания. Благодаря этому процесс сварки в значительной степени стабилизируется и требования к поддержанию точности сварочного режима снижаются. Эти выпрямители обеспечивают работу в широком диапазоне изменения сварочного тока и напряжения, позволяют выполнять сварку всех слоев сварного шва, включая корневой, с формированием обратного валика на весу во всех пространственных положениях. В основном применяется сварочная проволока сплошного сечения и порошковая диаметром 1,2 и 1,6 мм. Источники в судостроении применяются с механизмами подачи сварочной проволоки (типа ПДГ-322М и «Адмиралтеец»). Наиболее активно указанные источники применяются на ОАО «Севмаш», где они составляют основу парка сварочной техники.

Инверторные источники питания для дуговой сварки активно применяются на предприятиях

судостроения с 90-х годов. Наиболее активно использовались источники финской фирмы «Кемпари». Отечественные инверторные источники питания, отвечающие требованиям судостроения, до недавнего времени не производились.

Конверторные источники для сварки стали активно применяться в конце 90-х годов. Основное отличие конверторных источников от любых других сварочных источников питания — в том, что электрическое питание сварочных конверторов осуществляется от традиционных электрических шин напряжением постоянного тока 50–90 В, которые традиционно прокладываются по судну при его строительстве или ремонте. Это позволяет обеспечить требования безопасности при сварочных работах в помещениях с повышенной опасностью и минимизировать массогабаритные показатели сварочной техники. Для сварочных конверторов типовыми является несущая частота 19–21 кГц и использование IGBT-модулей. На рис. 1 приведены схема использования сварочных конверторов для ручной дуговой сварки и общий вид сварочных конверторов.

Используемые сварочные конверторы по типу питания можно условно разделить на два вида: сетевые (для работы от сетевого напряжения 380 В, 50 Гц) и конверторы, питающиеся от низковольтных шин постоянного тока.

Если преимущества сварочных конверторов, питающиеся от низковольтных шин, по сравнению с любыми другими источниками очевидны, то использование сетевых сварочных конверторов и электрического питания от стандартной электрической сети также имеет преимущества по сравнению с любыми источниками питания — к ним относится нечувствительность к броскам напряжения в заводской сети (в отличие от инверторных сварочных источников) и отсутствие негативного влияния на питающую электрическую сеть по сравнению опять же со сварочными инверторами.

Недостаток сетевых сварочных конверторов — их массогабаритные показатели, которые больше, чем у сварочных конверторов группы 4, но меньше, чем у традиционных сварочных установок (группы 1–3).

Впервые в России работы по созданию сварочных конверторов начались в ЗАО НПФ

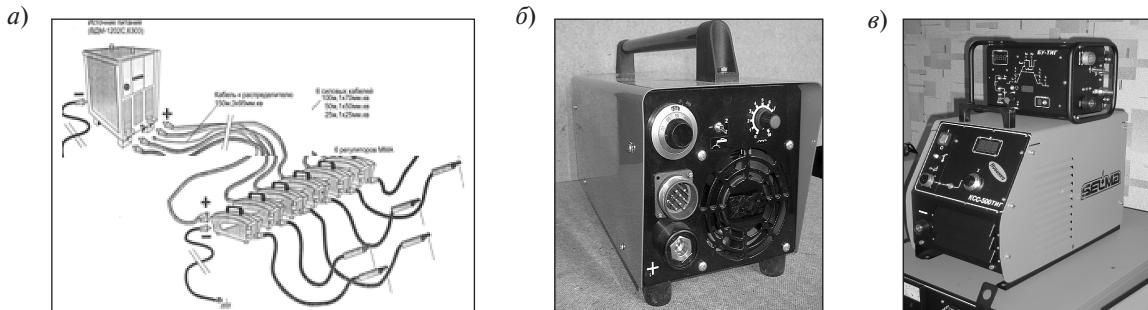


Рис. 1. Схема включения сварочных конверторов (а), общий вид универсального сварочного конвертора типа КСУ-320 (б) и сварочного конвертора КСС-500 ТИГ для аргонодуговой сварки титана (в)

«ИТС». Создана и промышленно освоена гамма сварочных конверторов КСУ-320 (серия 06 и серия 01–10) и КСУ-500 для ручной дуговой и механизированной сварки, КСС-50ТИГ — для аргонодуговой сварки титана и его сплавов, а также сетевые сварочные конверторы: ВД-1500 для автоматической сварки под слоем флюса с подачей ультразвука в область сварочной ванны; ВД-320КС (серия 03 и серия 01–10) и ВД-500КС для ручной дуговой, аргонодуговой и механизированной сварки.

В 2012 году на серийное производство поставлены новые конверторные источники КСУ-320 (серия 01–10), КСУ-500, а также сетевые конверторы ВД-320КС (серия 01–10) и ВД-500КС со значительно улучшенными характеристиками по механизированной сварке в защитных газах.

Основные потребители этих установок — ОАО «Севмаш» (более 400 сварочных конверторов) и ЦСС «Звездочка».

За рубежом наибольшие достижения по проектированию сварочных конверторов у фирм «Esseti» (Италия) и «Lincoln Electric» (США).

При выпуске новых конверторов КСУ-320, ВД-320КС, КСУ-500 и ВД-500КС использованы следующие основные схемные решения и подходы:

1. Конверторы КСУ-320 и сетевые конверторы ВД-320 КС выполнены с цифровой схемой управления. Технологическая модернизация этих установок будет осуществляться заменой микрочипа в их схеме управления. Имеют два мощных микропроцессора. На одном из них реализованы процессы ручной дуговой и аргонодуговой сварки, а также динамическое управление процессом механизированной сварки в защитных газах, на втором микропроцессоре — стабилизация напряжения в режиме механизированной сварки в защитных газах и ограничение тока короткого замыкания.

2. Конверторы КСУ-500 и ВД-500КС выполнены с аналоговой системой управления. Тех-

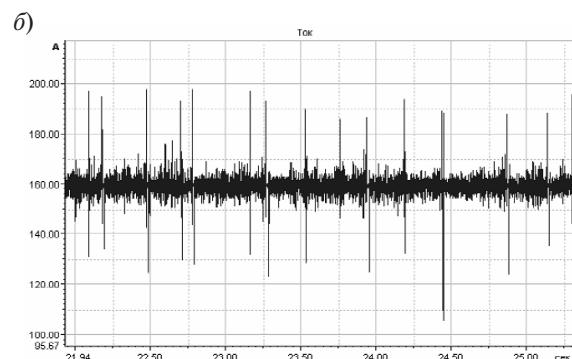
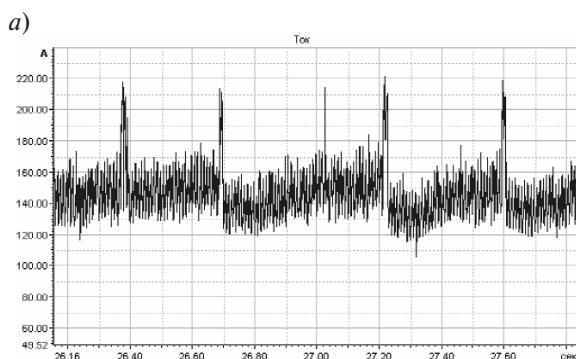


Рис. 2. Осциллограммы сварочного тока при многопостовой сварке с использованием балластных реостатов (а) и сварочных конверторов (б)



нологическая модернизация этих источников будет производиться заменой платы управления источниками.

3. Все конверторы выполнены с блоком снижения напряжения при ручной дуговой сварке, имеют эффективное регулирование индуктивности сварочной цепи.

На рис. 3 показан общий вид сетевых сварочных конверторов типов ВД-320КС (серия 01–10) и ВД-500КС.

Инверторные сварочные установки ВДУ-508 «Пионер» резонансного типа с адаптивными сварочными трансформаторами — новая для России ступень в развитии сварочных инверторов.

В ЗАО НПФ «ИТС» разработка этой установки велась последние три года. Указанная схема сварочной установки была выбрана исходя из того, что, как показали наши работы последних лет, выпуск инверторной сварочной техники по лицензии зарубежных компаний не представляется перспективным, так как стоимость такого производства дешевле стоимости оригинальных установок не более, чем на 10 %, и имеются серьезные ограничения по их доработке и адаптации к российским условиям.

Кроме того, фирма-производитель оказывается жестко привязанной к поставкам комплектующих изделий конкретного производителя. На примере многих других российских фирм очевидна неперспективность такого подхода.

Поэтому был взят курс на собственную разработку. За базу были выбраны некоторые сварочные инверторные источники питания веду-

щих мировых фирм. При этом очень важным критерием был принцип невысокой цены и возможность достижения максимальных сварочных свойств новых установок по сравнению с ведущими мировыми сварочными фирмами-производителями.

Другим принципом при разработке новых инверторных сварочных установок была максимальная адаптация элементной базы и схемных решений с новыми конверторными источниками (группа 5), чтобы обслуживание их на предприятиях вела одна группа специалистов.

Схемотехнически инверторы ВДУ-508 «Пионер» построены на основе резонансного преобразования с коммутацией силовых ключей в ноле тока (ZCS).

Источник характерен тем, что при коротком замыкании дугового промежутка (сварка в среде  $\text{CO}_2$ ) или резком повышении тока (сварка в смеси  $\text{Ar}-\text{CO}_2$ ) происходит увеличение собственной резонансной частоты сварочного контура, что при неизменной несущей частоте за дающего генератора преобразователя частоты ведет к ограничению тока короткого замыкания и уменьшению разбрызгивания.

На рис. 4 приведены для сравнения блок-схемы традиционных инверторных источников, инверторных источников резонансного типа и конверторных сварочных источников.

На рис. 4 используются следующие условные обозначения: 1 — сетевой фильтр, блокирующий входную ВЧ помеху; 2 — силовой выпрямитель; 3 — ключи ВЧ коммутации; 4 — блок питания системы управления; 5 — система управления; 6 — резонансная цепь.

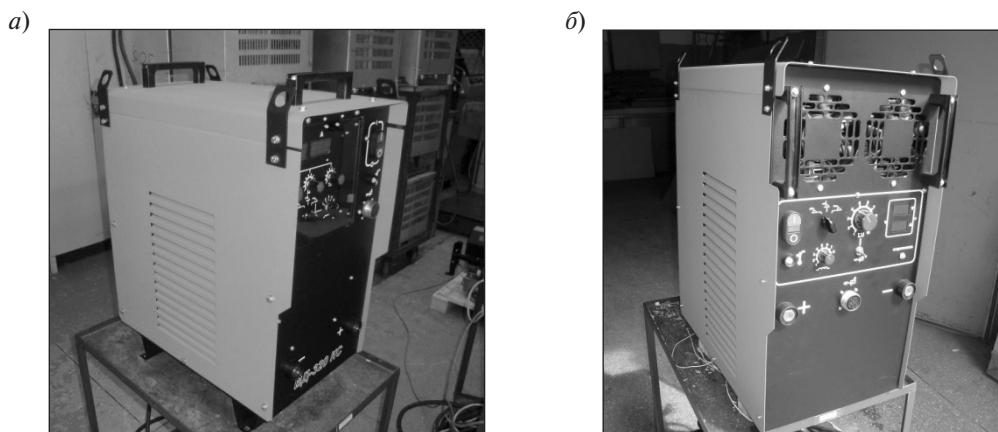
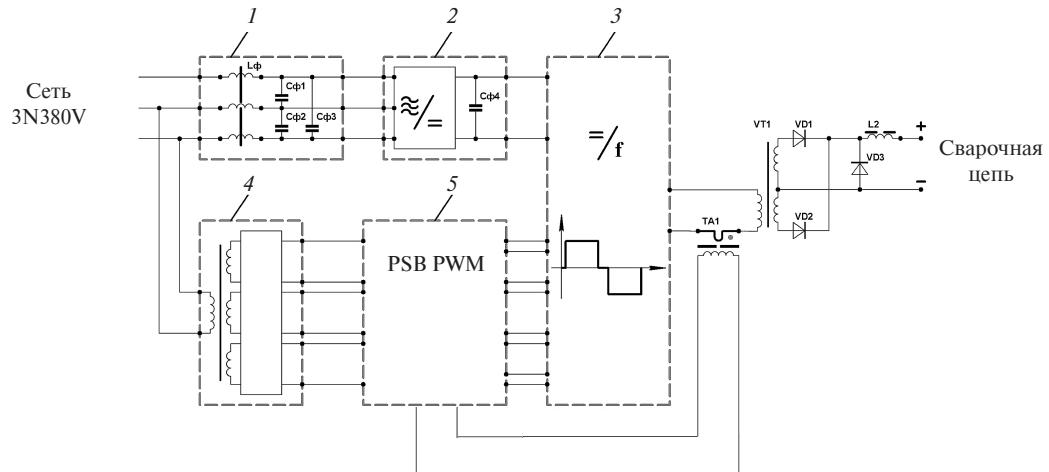
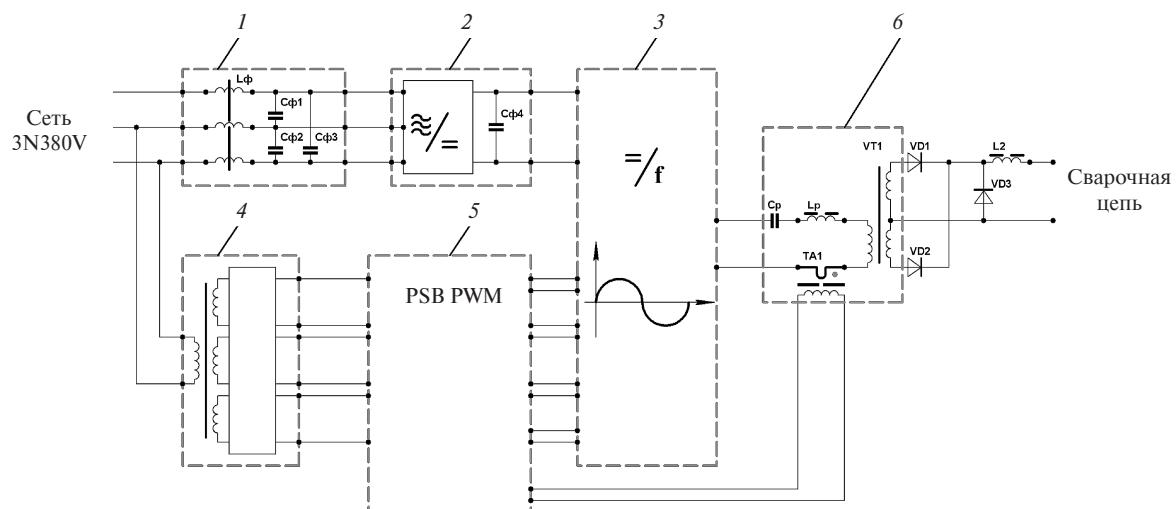


Рис. 3. Общий вид сетевых сварочных конверторов ВД-320КС (а) и ВД-500КС (б)

а)



б)



в)

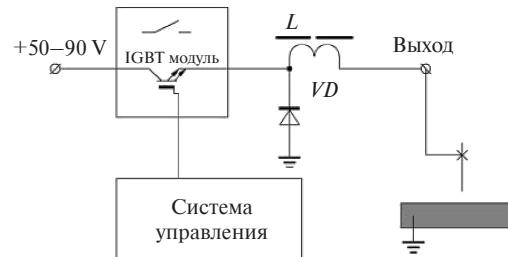


Рис. 4. Блок схемы традиционных сварочных инверторов (а), сварочных инверторов резонансного типа (б) и сварочных конверторов (в).

Конверторы (чопперы) являются непосредственными преобразователями постоянного тока в постоянный, предполагают работу при низких (допустимых ПУЭ) напряжениях питания и потому не обладают факторами снижения надежности, свойственным инверторам; кроме того, безопасны в эксплуатации



Быстродействие резонансного контура в силовой цепи намного превышает быстродействие, которое можно получить при помощи электронных схем управления, поэтому динамика отслеживания процесса переноса капель электродного металла у резонансных инверторов выше, как выше и стабильность процесса сварки.

Особенностью конструкции линии инверторов ВДУ-508 «Пионер» является и применение нанокристаллического магнитопровода высокочастотного трансформатора (материал, аналогичный магнитопроводам «Гаммамет»). Материал представляет собой известный железо-никелевый сплав «пермаллой», но последний способен работать с рабочей индукцией 0,8 Тл на частотах до 5 кГц, а измельчение кристаллической структуры сплава до «нано» уровня позволило поднять частоту с тем же значением рабочей индукции до 30 кГц, а с индукцией 0,6 Тл — до 50 кГц. Он сохраняет свои магнитные свойства при нагреве.

Улучшение свойств объясняется снижением затрат энергии (снижение значения коэрцитивной силы — уменьшение ширины петли гистерезиса) на перемагничивание доменных областей кристаллической структуры сплава. Указанное свойство позволяет применять относительно низкочастотные IGBT и MOSFET

модули, уже находящиеся в серийном производстве. Это делает сварочные инверторы «Пионер» конкурентоспособными на всех рынках продукции группы.

Как следует из анализа блок-схем построения сварочных инверторов традиционного и резонансного типа, различие между этими схемами связано с наличием резонансного контура 6, включающего дроссель, конденсатор и обмотку трансформатора. Этот контур подлежит настройке по резонансной частоте.

На наш взгляд, основное достоинство созданной новой линейки сварочной техники — в том, что, наряду с высокими технологическими свойствами новых установок (конверторных, сетевых конверторных и инверторных), они отвечают всем требованиям отечественного судостроения по части максимальной близости элементной базы и схемных решений. Это позволяет производить обслуживание всех новых установок силами одной группы специалистов.

В таблице приведены основные технические характеристики инверторных сварочных источников типа ВДУ-508 «ПИОНЕР», сварочных конверторов типа КСУ-320 (серия 01–10), КСУ-500, сетевых сварочных конверторов ВД-320КС (серия 01–10) и ВД-500КС.

#### Основные технические характеристики новой сварочной техники

Наименование источника	Режимы работы	Диапазон регулирования сварочного тока, А	Диапазон регулирования сварочного напряжения, В	Схема выпрямления тока	Схема управления	Масса, кг
КСУ-320 (серия 01–10)	MMA, MIG	60–320А 290А-ПВ100 %	—	Конвертор	Цифровая, 19–21 кГц	13
КСУ-500		50–500А 400А-ПВ100 %	—		Аналоговая, 19–21 кГц	26
ВД-320КС (серия 01–10)	MMA, MIG, TIG	60–320А 290А-ПВ100 %	15–32	Инвертор	Цифровая, 19–21 кГц	75
ВД-500КС		50–500А 400А-ПВ100 %	15–34		Аналоговая, 45КГц (Пионер), 19–21 кГц (ВД-500КС_)	115
ВДУ-508 «Пионер»		50–500А 400А-ПВ100 %	15–32			50

Приведенная классификация показывает, что дальнейшее развитие применения сварочной техники в судостроении пойдет в жесткой конкуренции между сварочными установками 4-й, 5-й и 6-й групп (инверторные и конверторные источники). Самый серьезный вопрос здесь — наличие специалистов по техническому обслуживанию сварочных установок. Далеко не на всех предприятиях произведена подготовка таких специалистов. Следует отметить, что для эффективного применения таких сварочных установок требуются хорошие электрические сети.

Сварочные установки 3-й группы, вероятнее всего, уйдут с рынка судостроения сами по себе из-за высокой себестоимости, вызванной их высокой материалоемкостью. Однако этот переход следует выполнять очень осторожно, так как на всех предприятиях судостроения уже имеются подготовленные группы специалистов для технического обслуживания именно этой группы установок.

Сварочные установки 2-й группы останутся незыблемыми на рынке судостроения из-за необходимости иметь в судостроении предельно ремонтопригодную технику. Обслуживание этой техники не вызывает вопросов и не требует специальной подготовки специалистов.

Сварочные установки 1-й группы останутся только в некоторых областях рынка судостроения, где требуется простая и высокопроизводительная сварка при минимальных требованиях к свойствам сварного шва.

Итак, основные выводы нашего исследования:

Представлена классификация источников питания для дуговой сварки в судостроении, содержащая шесть условных групп сварочных источников. На основании этой классификации определены направления работ по созданию новой дуговой техники, произведена разработка и освоено промышленное производство новой для России линейки сварочных источников инверторного и конверторного типов.

В области конверторных сварочных источников, предназначенных для питания от шинопроводов низкого напряжения (45–90 В), на рынок судостроения представлены новые источники — КСУ-320 (серия 01–10) и КСУ-500, основное отличие которых от конверторных

источников предыдущих версий заключается в новой компоновке, адаптированной к требованиям судостроения и наличию режимов высококачественной механизированной сварки плавящимся электродом в защитных газах. Новые источники успешно заменят старые конверторные источники при сварке на стапелях и в конструкциях на плаву.

В области сетевых сварочных конверторов, предназначенных для питания от стандартной электрической сети 380 В, 50 Гц, на рынок судостроения представлены новые универсальные источники ВД-320КС (серия 01–10) и ВД-500КС, основные отличия которых от аналогичных источников предыдущих версий заключаются в наличии режимов высококачественной механизированной сварки плавящимся электродом в защитных газах и адаптация к аргонодуговой сварке титана и его сплавов с помощью блока БУ-ТИГ. Новые источники успешно заменят старые для работы в условиях скачков напряжений питания электрических сетей и изношенности электрических сетей на стапелях и в промышленных цехах.

В области инверторных сварочных источников на рынок судостроения представлен новый универсальный инвертор резонансного типа ВДУ-508 «Пионер», который по своим сварочным свойствам способен успешно конкурировать с зарубежными инверторными установками для дуговой сварки. Предназначен для эксплуатации в условиях цехов промышленных предприятий.

Все новые источники питания адаптированы для эксплуатации в России по климатическим условиям, характеристикам отечественных электрических сетей, техническому обслуживанию. Все новые источники, независимо от принципа их работы (инвертор, конвертор), имеют схожие схемные решения и элементную базу, что позволяет существенно повысить эффективность их технического обслуживания. Благодаря этому принципу, новая линейка сварочных источников не имеет равных в мировой практике.

Производство новых источников питания осуществляется в условиях производственной кооперации на предприятиях, входящих в группу «ИТС», а именно: на ОАО «Сэлма» (Симферополь), ОАО «Эсва» (Калининград) и ЗАО НПФ «ИТС» (Санкт-Петербург).



УДК 539.374

Д.В. Латышев, А.А. Митюков,  
М.Ю. Петров, В.А. Попов

## ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ ПРИ ВОЗРАСТАЮЩИХ И ПОСТОЯННЫХ НАГРУЗКАХ.

### Часть 1

Один из разделов механики деформируемого твердого тела изучает ползучесть металлов при нормальной (комнатной) температуре, протекающую при напряжениях, превышающих предел текучести. По мнению Дж.Ф. Белла [1], эксперименты Кориолиса (1830 г.) по сжатию свинцовых образцов, в которых остаточная деформация определялась в функции приложенной нагрузки и времени ее действия, могут рассматриваться как первые опыты по изучению этого явления. В последующие годы не ослабевал интерес к ползучести металлов и сплавов при нормальной температуре, в частности к кратковременной ползучести. Подробный обзор теоретических и экспериментальных работ по названному разделу механики до 1990 годадается в работе [2]. Обсуждаются, в частности, опыты А.М. Жукова, А.С. Вавакина с сотрудниками, исследования ряда зарубежных ученых (Чанг, Ли, Кремпл, Финдли, Михно, Альден и др.), посвященные ползучести конструкционных материалов при циклическом деформировании, влиянию на нее нагружения при различных скоростях по прямолинейным и многозвенным траекториям, предварительной деформации и другим вопросам. Признается актуальность проблемы учета и оценки временных эффектов при нормальной температуре для современной механики деформируемого твердого тела и одновременно недостаток экспериментальных исследований в этой области.

При изучении упруговязкопластических материалов используется гипотеза, согласно которой тензор деформаций может быть представлен в виде суммы

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^v, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{ij}^e$ ,  $\varepsilon_{ij}^p$ ,  $\varepsilon_{ij}^v$  — соответственно компоненты упругой, пластической и вязкой деформаций. П. Пекина указывал [3], что представление (1)

в общем случае не будет справедливым и вводится в качестве упрощающего выкладки предположения.

Для общего случая нагружения и действия иных факторов Ж.-Л. Шабоша с сотрудниками [5] предлагает следующее разложение деформаций:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^{vp} + \varepsilon_{ij}^{th} + \varepsilon_{ij}^{cp}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{ij}^{vp}$ ,  $\varepsilon_{ij}^{th}$ ,  $\varepsilon_{ij}^{cp}$  — соответственно компоненты вязкопластической, температурной и определяемой фазовыми переходами деформаций. При деформировании материала в условиях нормальной температуры два последних слагаемых из рассмотрения исключаются, и основная гипотеза упруговязкопластического тела выражается следующим образом:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^{vp}. \quad (3)$$

При формулировке определяющих уравнений упруговязкопластического тела используются две основные концепции зависимости поведения материала от скорости деформации [6]. Согласно первой [7, 8] постулируется существование единой динамической зависимости между напряжением  $\sigma$  и полной деформацией  $\varepsilon$ , т. е. — диаграммы мгновенного или быстрого нагружения  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ . В противоположность первой по второй концепции [9] в качестве основной предлагается использовать диаграмму  $\sigma_t = \sigma_t(\varepsilon_t)$  медленного (равновесное или квазистатическое) нагружения. Оба эти представления будут использоваться в дальнейшем.

Особенностью данной работы является изучение вязкопластических свойств при нормальной (комнатная) температуре и весьма высоком уровне неупругой деформации: от значения, отвечающего начальному пределу текучести, до величины, соответствующей нарушению однородного напряженно-деформированного состо-

## Расчетные формулы. Пути нагружения в пространстве напряжений

ятия (локализация деформации и (или) разрушение). По сути, изучается кратковременная ползучесть хромоникелевой стали при нормальной температуре. Материал предполагается упруговязкопластическим, принимается основная гипотеза в форме (3), где  $\varepsilon_{ij}^p$  означает компоненты мгновенной пластической деформации,  $\varepsilon_{ij}^{vp}$  — компоненты вязкопластической деформации, подчиняющейся законам вязкопластического течения.

### Оборудование для проведения испытаний.

#### Образцы. Измерительные приборы

Опыты проводились на установке [10], позволяющей нагружать трубчатые образцы по схеме  $p_{\text{в}} - p_{\text{н}} - P$  (то есть с учетом внутреннего и наружного давления, а также осевой силы). Два вида напряженного состояния —  $\alpha = \sigma_{\theta}/\sigma_z = \infty$  (кольцевое растяжение), где  $\sigma_{\theta}$ ,  $\sigma_z$  — кольцевое и осевое напряжения;  $\alpha = 2$  (закрытая труба под внутренним давлением) — осуществлялись вне камеры. В первом случае использовалось устройство для кольцевого растяжения [4], во втором — образец в собранном с захватами виде включался в гидравлическую систему грузопоршневого манометра. В обоих случаях использовалась его насосная установка.

Испытуемые образцы нарезались из цельнотянутых труб, изготовленных по ТУ 14-3-299-74 из стали Х18Н10Т-ВД (ЭП-502). По сертификату ее механические свойства таковы:  $\sigma_{0,2} = 325$  МПа,  $\delta_5 = 45\%$ ;  $\psi = 60\%$ . Трубы относились к одной партии и использовались в состоянии поставки. Размеры образцов составляли: наружный диаметр  $d_{\text{но}} = 26,4$  мм, толщина стенки  $t_0 = 0,3$  мм. Разностенность, выявляемая обычным образом на оправке, не превышала 0,01 мм. Длина рабочей части составляла 6–8 диаметров. Базовые размеры — наружный диаметр и расстояние между поперечными рисками по образующей — измерялись микрометром и штангенциркулем с ценой деления соответственно 0,01 и 0,05 мм. При этом размер по образующей в 3–5 раз превышал диаметр. Давления рабочей жидкости измерялись образцовыми манометрами с пределами измерений 0–100, 0–400 и 0–600 кг/см<sup>2</sup>. Последние подвергались тщательной выверке посредством грузопоршневого манометра с последующей в случае необходимости регулировкой.

Напряжения, возникающие в образце, — осевое  $\sigma_z$ , кольцевое  $\sigma_{\theta}$  и радиальное  $\sigma_r$  — при испытаниях в камере и на воздухе ( $\alpha = \sigma_{\theta}/\sigma_z = 2,0$ ) вычислялись по формулам

$$\begin{aligned}\sigma_z &= (p_{\text{в}} - p_{\text{н}}) \frac{d_{\text{cp}}}{2t} - \\ &- \frac{1}{2}(p_{\text{в}} - p_{\text{н}}) + (p_{\text{в}} - p_0) \frac{d_0^2}{4d_{\text{cp}}t}; \\ \sigma_{\theta} &= (p_{\text{в}} - p_{\text{н}}) \frac{d_{\text{cp}}}{2t} - \frac{1}{2}(p_{\text{в}} - p_{\text{н}}); \\ \sigma_r &= -\frac{1}{2}(p_{\text{в}} + p_{\text{н}}),\end{aligned}\quad (4)$$

где  $p_{\text{в}}$ ,  $p_{\text{н}}$ ,  $p_0$  — давления внутреннее, наружное и под плунжером, передающим на образец осевую силу;  $d_{\text{cp}}$ ,  $t$  — текущие средний диаметр и толщина стенки образца;  $d_0$  — диаметр плунжера ( $d_0 = 20$  мм).

При деформировании образцов в устройстве для кольцевого растяжения [4] напряжения определялись так:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= p_{\text{в}} \frac{d_{\text{но}}}{4t_0} e^{\varepsilon_z} (e^{2\varepsilon_{\theta}} - 1); \\ \sigma_{\theta} &= p_{\text{в}} \left( \frac{d_{\text{но}}}{2t_0} e^{2\varepsilon_{\theta} + \varepsilon_z} - 1 \right); \quad \sigma_r = -\frac{1}{2} p_{\text{в}}.\end{aligned}\quad (5)$$

Здесь  $d_{\text{но}}$ ,  $t_0$  — начальные наружный диаметр и толщина стенки;  $\varepsilon_z$ ,  $\varepsilon_{\theta}$  — осевая и кольцевая логарифмические деформации.

Деформированное состояние образца оценивалось интенсивностью деформаций

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}, \quad (6)$$

где

$$E_1 = \varepsilon_z; \quad E_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} (\varepsilon_z + 2\varepsilon_{\theta}). \quad (7)$$

В случае непропорционального нагружения

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\int dE_1^2 + dE_2^2}. \quad (8)$$

Мерой напряженного состояния служила интенсивность напряжений



$$\bar{\sigma} = \sqrt{\Sigma_1^2 + \Sigma_2^2}, \quad (9)$$

где

$$\Sigma_1 = \sigma_z - \frac{\sigma_\theta}{2} - \frac{\sigma_r}{2}; \quad \Sigma_2 = \frac{\sqrt{3}}{2}(\sigma_\theta - \sigma_r). \quad (10)$$

Таким образом, процесс нагружения рассматривается в двумерном пространстве напряжений  $\Sigma_1 \Sigma_2$  Прагера — Ильюшина, а соответствующий процесс деформирования — в пространстве  $E_1 E_2$ .

Осьевая и кольцевая логарифмические деформации подсчитывались по формулам

$$\varepsilon_z = \ln(L/L_0), \quad \varepsilon_\theta = \ln(d_{h0}/d_h). \quad (11)$$

Радиальная деформация

$$\varepsilon_r = \ln(t/t_0) \quad (12)$$

находилась из условия постоянства объема

$$\varepsilon_z + \varepsilon_\theta + \varepsilon_r = 0. \quad (13)$$

Здесь  $L$ ,  $t$  и  $L_0$ ,  $t_0$  — текущие и начальные значения базовой длины по образующей и толщины стенки.

### Программа опытов

В плоскости  $\Sigma_1 \Sigma_2$  пути пропорционального нагружения представляются лучами, исходящими из начала координат. Напряженное состояние при этом можно характеризовать углом  $\psi$ , который луч составляет с осью  $\Sigma_1$ ; таким образом,  $\operatorname{tg} \psi = \Sigma_2 / \Sigma_1$ . Плоское напряженное состояние задается параметром  $\alpha = \sigma_\theta / \sigma_z$ . Связь между названными величинами согласно (10) (при  $\sigma_r = 0$ ) устанавливается выражением

$$\alpha = 2 \operatorname{tg} \psi / (\sqrt{3} + \operatorname{tg} \psi). \quad (14)$$

При нагружении образца в камере любой путь (не только пропорциональный) осуществляется последовательным изменением параметров нагрузки (давлений  $p_b$ ,  $p_h$ ,  $p_0$ ) по заданной программе. В координатах  $\Sigma_1 \Sigma_2$  в диапазоне от осевого ( $\psi = 0$ ) до кольцевого ( $\psi = 120$ ) растяжений можно указать четыре пропорциональных пути, нагружение по которым осуществляется одним параметром:

1)  $\psi = 0$  ( $\alpha = 0$ ). Опыт проводится в камере при  $p_b = p_h = p$ . При этом величинами  $\sigma_\theta = \sigma_r = -p$  можно пренебречь по сравнению с  $\sigma_z$ ;

2)  $\psi = 30^\circ$  ( $\alpha = 0,5$ ). Из подобия девиаторов напряжений и деформаций следует, что  $\varepsilon_\theta = 0$ ,

т. е. средний диаметр не изменяется. Из (7) и (10) с использованием (4) получаем

$$p_b = (1 + 1/3k^2) p_h, \quad (15)$$

где  $k = d_{cp}/d_0 = \text{const}$ .

Таким образом, при  $\psi = 30^\circ$  внутреннее  $p_b$  и наружное  $p_h$  давления связаны постоянным соотношением. Включение между наружной и внутренней полостями образца несложного гидравлического преобразователя с определенным отношением диаметров плунжеров обеспечивает однопараметрическое нагружение;

3)  $\psi = 90^\circ$  ( $\alpha = 2,0$ ). Этот путь, как уже упоминалось, легко реализуется вне камеры. Заметим, что два последних вида напряженного состояния (при  $\psi = 30^\circ$ ,  $\varepsilon_\theta = 0$ ; при  $\psi = 90^\circ$ ,  $\varepsilon_z = 0$ ) представляют плоскую деформацию;

4)  $\psi = 120^\circ$  ( $\alpha = \infty$ ). Чистое кольцевое растяжение может быть создано в камере действием всех трех давлений ( $p_b$ ,  $p_h$ ,  $p_0$ ). С целью повышения производительности труда образцы испытывались с помощью упомянутого выше устройства. Надо сказать, что при испытании образца по мере увеличения его диаметра появляется и возрастает осевое напряжение. Максимальное значение  $\sigma_z$  (нездолго до образования локальной деформации и разрушения) составляло 18 % от  $\sigma_\theta$ .

### Программа нагружения

Кратковременная ползучесть в условиях возрастающей нагрузки изучалась по результатам деформирования трубчатых образцов по названным путям (рис. 1, а). Процесс нагружения состоял из определенного числа ступеней (19–35 при каждом виде испытаний) вплоть до нарушения однородной деформации. Испытывались попарно образцы, представляющие смежные отрезки средней части трубы. Первый на каждой ступени выдерживался одну секунду, разгружался и извлекался из камеры для измерений. Аналогичной процедуре подвергался второй (парный) образец, но выдержка на каждой ступени перед разгрузкой составляла пять минут. Идеализированные диаграммы нагружения парных образцов представлены на рис. 1, б, в. Таким образом, диаграмма нагружения с выдержкой времени на каждой ступени отличается от аналогичной для мгновенного нагружения тем, что имеет горизонтальную площадку, соответствующую пятиминутному промежутку времени.

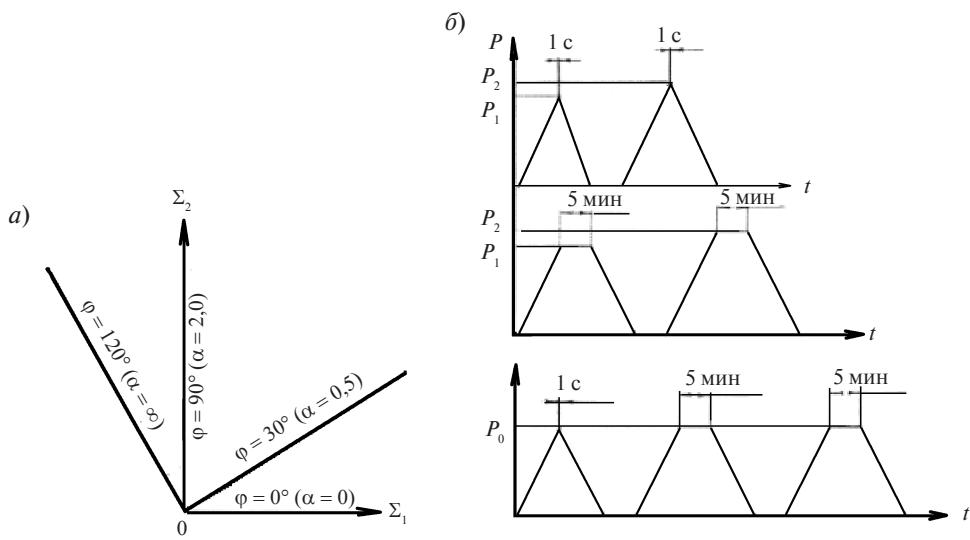


Рис. 1. Экспериментальное изучение кратковременной ползучести при деформировании трубчатых образцов: *а* — пути пропорционального нагружения; *б* — идеализированные диаграммы ступенчатого нагружения парных образцов; *с* — испытание на ползучесть при постоянной нагрузке

Выражение (3) с достаточной для инженерных целей точностью можно представить в виде

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}^e + \bar{\varepsilon}^p + \bar{\varepsilon}^v, \quad (16)$$

где  $\bar{\varepsilon}$ ,  $\bar{\varepsilon}^e$ ,  $\bar{\varepsilon}^p$ ,  $\bar{\varepsilon}^v$  — интенсивности соответственно полной, упругой, мгновенной пластической и вязкопластической деформаций.

После разгрузки на каждой ступени неупругая деформация составит:

при мгновенном нагружении

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}^p; \quad (17)$$

при нагружении с выдержкой времени

$$\bar{\varepsilon}_t = \bar{\varepsilon}^p + \bar{\varepsilon}^v. \quad (18)$$

Разность этих величин представляет деформацию, обусловленную вязкопластическими свойствами, при определенных уровнях нагрузки и времени выдержки:

$$\bar{\varepsilon}^v = \bar{\varepsilon}_t - \bar{\varepsilon}. \quad (19)$$

### Результаты опытов в условиях возрастающей нагрузки

На рис. 2, *а*, *б*, *в*, *г* для названных выше путей нагружения представлены диаграммы деформирования («интенсивность напряжений — интен-

сивность деформаций») для каждой пары образцов:  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon})$  — по результатам испытаний образца в условиях мгновенного нагружения ( $t = 1$  сек на каждой ступени);  $\bar{\sigma}_t = \bar{\sigma}_t(\bar{\varepsilon}_t)$  — для парного образца, испытанного с выдержкой времени  $t = 5$  мин на каждой ступени. Как видно из рисунков, кривая  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon})$  при всех видах напряженного состояния проходит выше графика  $\bar{\sigma}_t = \bar{\sigma}_t(\bar{\varepsilon}_t)$ . Для пояснения графиков в табл. 1 и 2 приведены выдержки из журнала наблюдений и обработки результатов испытаний при нагружении образцов по лучам  $\psi = 0$  и  $\psi = 90^\circ$ . Обращает на себя внимание следующее обстоятельство: после завершения каждой ступени оказывается  $\bar{\varepsilon}_t > \bar{\varepsilon}$  и соответствующее значение  $\bar{\sigma}_t$  также больше  $\bar{\sigma}$ . На том же рисунке приведены графики зависимости вязкопластической деформации, определяемой по (19), от полной неупругой деформации образца, испытуемого с выдержкой времени. Несмотря на значительный разброс экспериментальных точек, имеет место нелинейная монотонно возрастающая зависимость  $\bar{\varepsilon}^v = \bar{\varepsilon}^v(\bar{\varepsilon}_t)$ .

На рис. 2, *д* графики  $\bar{\sigma}_t = \bar{\sigma}_t(\bar{\varepsilon}_t)$  и  $\bar{\varepsilon}^v = \bar{\varepsilon}^v(\bar{\varepsilon}_t)$  представлены в совмещенном виде. Максимальное расхождение кривых  $\bar{\sigma}_t = \bar{\sigma}_t(\bar{\varepsilon}_t)$  (при  $\bar{\varepsilon}_t = 0,386$ ) по напряжениям составляет 11,3 %. Гра-

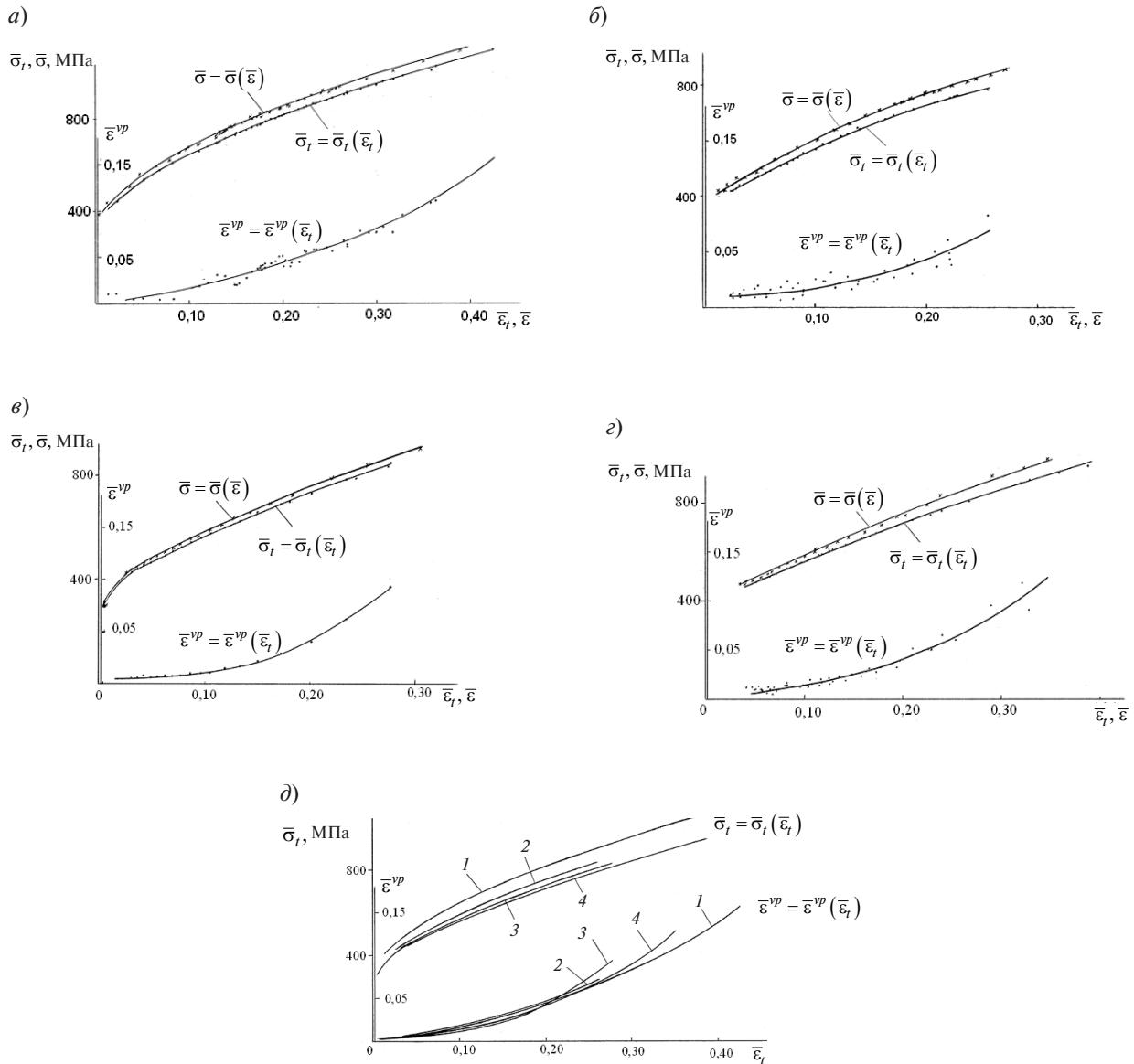


Рис. 2. Диаграммы деформирования парных образцов, а также зависимости вязкопластической составляющей от полной неупругой деформации при нагружении по разным лучам  $\psi$   
 (а – 0, б – 30, в – 90 и г – 120) и совмещенные кривые (д)  $\bar{\sigma}_t = \bar{\sigma}_t(\bar{\varepsilon}_t)$  и  $\bar{\varepsilon}^{vp} = \bar{\varepsilon}^{vp}(\bar{\varepsilon}_t)$   
 (при 1 –  $\psi = 0^\circ$ ; 2 –  $\psi = 30^\circ$ ; 3 –  $\psi = 90^\circ$ ; 4 –  $\psi = 120^\circ$ )

фики  $\bar{\varepsilon}^{vp} = \bar{\varepsilon}^{vp}(\bar{\varepsilon}_t)$  в промежутке  $0,025 \leq \bar{\varepsilon}_t \leq 0,23$  располагаются в весьма узкой полосе; при  $\bar{\varepsilon}_t > 0,23$  они расходятся широким веером. Тем не менее отношение максимального значения вязкопластичной деформации к полной неупругой деформации для предельного однородного состояния различаются незначительно (табл. 3).

Таким образом, с достаточной для практических целей точностью величину  $\bar{\varepsilon}^{vp} / \bar{\varepsilon}_t$  можно признать инвариантной относительно вида

напряженного состояния. Заметим, что меньшие значения этой величины относятся к состоянию плоской деформации.

Здесь не рассматривается вопрос относительного расположения кривых  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon})$  мгновенного нагружения, поскольку для стали X18H10T он подробно обсуждался в работе [11].

Прежде чем устанавливать связь между вязкопластической деформацией и напряжением, заметим, что разность ординат диаграмм мгно-

Таблица 1

а) Образец №1 ( $l_0 = 64,25$  мм;  $d_{h0} = 26,33$  мм,  $t_0 = 0,30$  мм). Выдержка времени на каждой ступени нагружения  $t = 5$  мин

Номер ступени нагружения	$P_b = P_h$ , МПа	$l$ , мм	$d_h$ , мм	$\varepsilon_z$	$\varepsilon_0$	$\varepsilon_r$	$t$ , мм	$\sigma_z$ , МПа	$\sigma_0$ , МПа	$\sigma_r$ , МПа	$\Sigma_1$ , МПа	$\Sigma_2$ , МПа	$E_1$	$E_2$	$\bar{\varepsilon}_r$	$\bar{\sigma}_r$ , МПа
1	30,0	65,05	26,215	0,0124	-0,004	-0,008	0,298	358,9	-30,0	-30,0	388,9	0	0,012	0,002	0,013	388,9
2	33,6	65,5	26,039	0,0125	-0,011	-0,010	0,297	406,0	-33,6	-33,6	439,6	0	0,022	-0,001	0,022	439,6
3	37,8	66,95	25,785	0,0412	-0,021	-0,020	0,294	466,5	-37,8	-37,8	504,3	0	0,041	-0,001	0,041	504,3
4	39,6	67,70	25,656	0,0520	-0,026	-0,026	0,292	494,7	-39,6	-39,6	534,3	0	0,052	0	0,052	534,3
5	42,0	68,75	25,486	0,0691	-0,033	-0,036	0,289	534,3	-42,0	-42,0	576,3	0	0,069	0,002	0,069	576,3
6	43,8	69,80	25,330	0,083	-0,39	-0,044	0,287	564,4	-43,8	-43,8	609,2	0	0,083	0,003	0,083	609,2
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
35	56,1	92,40	22,301	0,363	-0,166	-0,197	0,246	976,6	-56,1	-56,1	1032,7	0	0,363	0,018	0,364	1032,7
36	56,4	98,15	21,481	0,424	-0,204	-0,220	0,241	1046,6	-56,4	-56,4	1103,0	0	0,424	0,009	0,424	1103,0

б) Образец №2 ( $l_0 = 54,70$  мм;  $d_{h0} = 26,33$  мм,  $t_0 = 0,30$  мм). Выдержка времени на каждой ступени нагружения  $t = 1$  сек

Номер ступени нагружения	$P_b = P_h$ , МПа	$l$ , мм	$d_h$ , мм	$\varepsilon_z$	$\varepsilon_0$	$\varepsilon_r$	$t$ , мм	$\sigma_z$ , МПа	$\sigma_0$ , МПа	$\sigma_r$ , МПа	$\Sigma_1$ , МПа	$\Sigma_2$ , МПа	$E_1$	$E_2$	$\bar{\varepsilon}_r$	$\bar{\sigma}_r$ , МПа
1	30,0	54,85	26,286	0,0027	-0,0017	-0,0010	0,300	355,2	-30,0	-30,0	385,2	0	0,0027	-0,0004	0,003	385,2
2	33,6	55,35	26,139	0,012	-0,007	-0,004	0,299	401,8	-33,6	-33,6	435,4	0	0,012	-0,002	0,012	435,4
3	37,8	56,75	25,849	0,0368	-0,018	-0,018	0,295	464,4	-37,8	-37,8	502,2	0	0,037	-0,0001	0,037	502,2
4	39,6	57,35	25,721	0,047	-0,023	-0,024	0,293	492,0	-39,6	-39,6	531,6	0	0,047	0,0002	0,047	531,6
5	42,0	58,35	25,504	0,0646	-0,032	-0,033	0,290	531,7	-42,0	-42,0	573,7	0	0,065	0,0004	0,065	573,7
6	43,8	59,20	25,341	0,079	-0,038	-0,041	0,288	563,2	-43,8	-43,8	607,0	0	0,079	0,001	0,079	607,0
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
35	56,1	70,40	23,496	0,252	-0,114	-0,138	0,261	868,2	-56,1	-56,1	923,4	0	0,252	0,014	0,253	924,3
36	56,4	70,70	23,427	0,257	-0,117	-0,140	0,261	876,8	-56,4	-56,4	933,2	0	0,257	0,013	0,257	933,2

Таблица 2

Обработанные результаты испытаний трубчатых образцов при нагружении по лучу  $\Psi = 90^\circ$ а) Образец № 7 ( $d_{h0} = 26,28 \text{ мм}$ ,  $t_0 = 0,30 \text{ мм}$ ) Выдержка времени на каждой ступени нагружения  $t = 5 \text{ мин}$ 

Номер ступени нагружения	$P_{h^*}$ МПа	$d_{h^*}$ мм	$\varepsilon_z$	$\varepsilon_0$	$\varepsilon_r$	$t$ , мм	$\sigma_z$ МПа	$\sigma_0$ МПа	$\sigma_r$ МПа	$\Sigma_z$ МПа	$E_1$	$E_2$	$\bar{\varepsilon}_t$	$\bar{\sigma}_t$ , МПа
5	11,4	27,42	0	0,043	-0,043	0,287	263,3	532,3	-5,7	0	465,9	0	0,049	465,9
6	11,6	27,58	0	0,048	-0,048	0,286	271,1	548,0	-5,8	0	479,6	0	0,056	479,6
7	11,8	27,74	0	0,054	-0,054	0,284	279,1	564,2	-5,9	0	493,7	0	0,063	493,7
8	12,0	27,92	0	0,061	-0,061	0,282	287,6	581,2	-6,0	0	508,6	0	0,070	508,6
9	12,2	28,12	0	0,068	-0,068	0,280	296,8	599,7	-6,1	0	524,7	0	0,078	524,7
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
18	13,9	32,19	0	0,203	-0,203	0,245	446,1	899,1	-6,9	0	790,0	0	0,235	790,0
19	14,0	33,40	0	0,240	-0,240	0,236	484,7	976,5	-7,0	0	851,7	0	0,277	851,7

б) Образец № 8 ( $d_{h0} = 26,28 \text{ мм}$ ,  $t_0 = 0,30 \text{ мм}$ ). Выдержка времени на каждой ступени нагружения  $t = 1 \text{ сек}$ 

Номер ступени нагружения	$P_{h^*}$ МПа	$d_{h^*}$ мм	$\varepsilon_z$	$\varepsilon_0$	$\varepsilon_r$	$t$ , мм	$\sigma_z$ МПа	$\sigma_0$ МПа	$\sigma_r$ МПа	$\Sigma_z$ МПа	$E_1$	$E_2$	$\bar{\varepsilon}_t$	$\bar{\sigma}_t$ , МПа
5	11,4	27,27	0	0,037	-0,037	0,269	260,4	526,5	-5,7	0	460,9	0	0,043	460,9
6	11,6	27,40	0	0,042	-0,042	0,288	267,6	540,9	-5,8	0	473,5	0	0,049	473,5
7	11,8	27,56	0	0,048	-0,048	0,286	275,5	556,8	-5,9	0	487,3	0	0,055	487,3
8	12,0	27,74	0	0,054	-0,054	0,284	283,8	573,7	-6,0	0	502,0	0	0,063	502,0
9	12,2	27,90	0	0,060	-0,060	0,282	292,2	590,4	-6,1	0	516,6	0	0,070	516,6
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
18	13,9	30,51	0	0,150	-0,150	0,258	400,5	807,5	-6,9	0	698,5	0	0,173	698,5
19	14,0	30,81	0	0,159	-0,159	0,256	411,1	829,1	-7,0	0	724,1	0	0,184	724,1



венного и квазистатического деформирований принято называть неравновесным напряжением [12]. Считается, что интенсивность неравновесных напряжений ответственна за деформацию ползучести как при одноосном, так и при сложном напряженных состояниях.

Обратимся теперь к графикам «интенсивность напряжений — интенсивность деформаций», расположенным в левом верхнем углу рис. 3. Здесь точки 1 и 1<sub>t</sub> характеризуют напряженно-деформированное состояние в стенках парных образцов после завершения первой ступени нагружения. Вязкопластическая деформация при этом будет равна

$$\bar{\varepsilon}^{vp} = \bar{\varepsilon}_{1t} - \bar{\varepsilon}_1,$$

а отвечающая ей интенсивность неравновесных напряжений составит

$$\bar{\sigma}^* = \bar{\sigma} - \bar{\sigma}_{1t},$$

где  $\bar{\sigma}$  — ордината диаграммы мгновенного напряжения, соответствующая  $\bar{\varepsilon}_{1t}$ .

Сказанное справедливо для каждой пары точек последующих ступеней нагружения. Графики зависимостей  $\bar{\varepsilon}^{vp} = \bar{\varepsilon}^{vp}(\bar{\sigma}^*)$  для всех путей нагружения приведены на рис. 3. Для лучей  $\psi =$

Таблица 3  
Отношение максимального значения  
вязкопластической деформации  
полной неупругой деформации  
при различных путях нагружения

$\varphi$ , град	$\alpha = \sigma_0/\sigma_z$	$\bar{\varepsilon}^{vp}/\bar{\varepsilon}_t, \%$
0	0	37,0
30	0,5	27,5
90	2,0	34,5
120	$\infty$	36,6

$= 0, \psi = 90^\circ$  все необходимые расчетные значения даны в табл. 1 и 2, значения ординат  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon})$  взяты с соответствующих графиков.

Как следует из рисунка, на характер кривых существенное влияние оказывает вид напряженного состояния.

### Результаты опытов в условиях действия постоянной нагрузки

Заключительные опыты посвящены изучению второй стадии ползучести при различных уровнях нагрузки и третьей стадии (стадия разрушения).

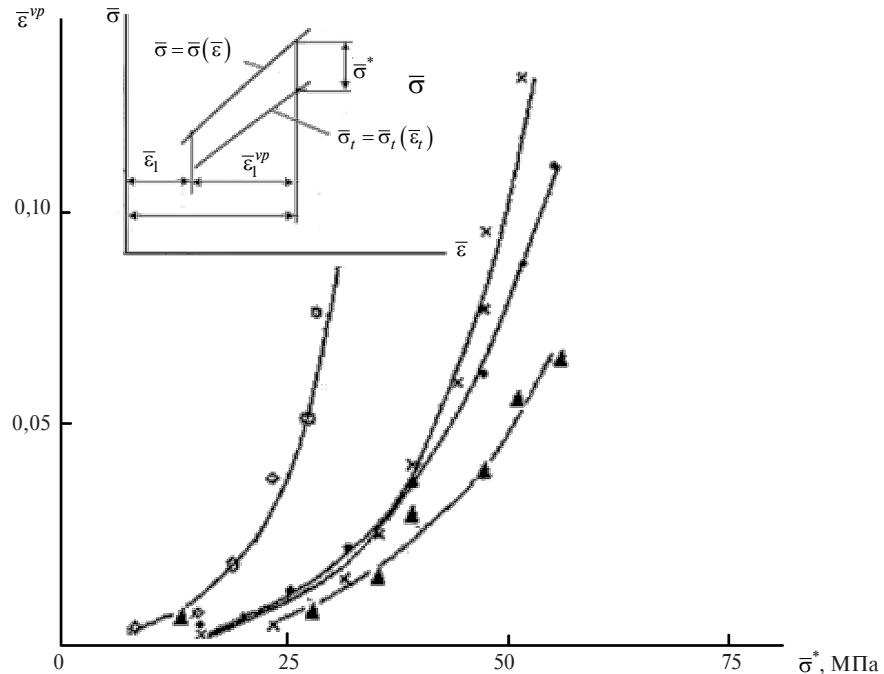


Рис. 3. Графики зависимости вязкопластической деформации от разности напряжений  
( $\times$  —  $\psi = 0$ ;  $\blacktriangle$  —  $\psi = 30$ ;  $\circ$  —  $\psi = 90$ ;  $\bullet$  —  $\psi = 120^\circ$ )



Нагружение осуществлялось по пути  $\psi = 90^\circ$  ( $\alpha = \sigma_0 / \sigma_z = 2,0$ ) до определенного уровня внутреннего давления, которое выдерживалось одну секунду. Затем образец полностью разгружался, производились его замеры в пределах рабочей части. По произведенным измерениям вычислялась мгновенная пластическая деформация  $\bar{\varepsilon}^p$ . Последующие нагружения сопровождались пятиминутными выдержками (рис. 1, в). При низких уровнях нагрузки выдержки времени составляли 10–30 мин. После выдержки и разгрузки вновь производились замеры и т. д. Кривые, отвечающие второй стадии ползучести при различных уровнях нагрузки (давления), представлены на рис. 4. Здесь по оси ординат указана полная неупругая деформация, т. е. в соответствии с (18)

$$\bar{\varepsilon}_t = \bar{\varepsilon}^p + \bar{\varepsilon}^v$$

Отношение интенсивности напряжений  $\bar{\sigma}_0$  в начале опыта (при заданном давлении) к пределу текучести  $\sigma_{0,2}$  составило соответственно:

- 1)  $p_b = 12,8$  МПа ( $\bar{\sigma}_0 / \sigma_{0,2} = 1,717$ );
- 2)  $p_b = 13,6$  МПа ( $\bar{\sigma}_0 / \sigma_{0,2} = 1,952$ );
- 3)  $p_b = 13,8$  МПа ( $\bar{\sigma}_0 / \sigma_{0,2} = 2,142$ ).

4) Третья стадия ползучести представлена на рис. 4 кривой 4, отвечающей давлению  $p_b = 14,0$  МПа ( $\bar{\sigma}_0 / \sigma_{0,2} = 2,219$ ).

Из-за ограниченности объема статьи затруднительно провести развернутое сравнение с результатами экспериментов других авторов. Тем

не менее отметим соответствие результатов. Так, например, действительные и квазистатические диаграммы деформирования в [12] для стали 15Х2МФА аналогичны кривым  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon})$  и  $\bar{\sigma}_t = \bar{\sigma}_t(\bar{\varepsilon}_t)$  в наших опытах со сталью X18H10T. Вполне обоснованной представляется гипотеза обобщенной квазистатической диаграммы деформирования. Следует заметить, что в подавляющем большинстве экспериментальных работ вязкопластические свойства изучались при максимальном значении неупругой деформации, не превышающей 4 % (в нашей работе — 42,6 %).

Заключая статью, сформулируем основные результаты.

Экспериментально изучались вязкопластические свойства при нормальной температуре и различных путях пропорционального нагружения широко употребляемой высокопластичной стали X18H10T.

Испытания парных образцов в условиях возрастания ступенчатых нагрузок показали:

диаграммы деформирования («интенсивность напряжений — интенсивность деформаций»), построенные по экспериментам мгновенного нагружения, проходят выше аналогичных, полученных в опытах с выдержкой времени, при всех рассмотренных видах напряженного состояния;

зависимость вязкопластической составляющей от полной неупругой деформации в про-

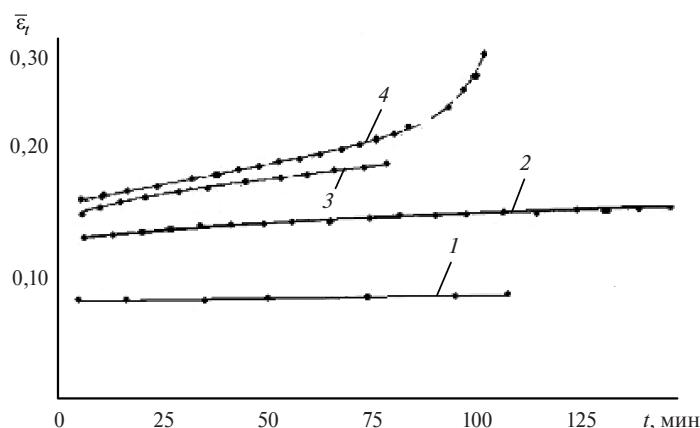


Рис. 4. Графики зависимости полной неупругой деформации от времени при различных уровнях нагрузки на второй стадии ползучести

(1 —  $p_b = 12,8$  МПа ( $\bar{\sigma}_0 / \sigma_{0,2} = 1,717$ ); 2 —  $p_b = 13,6$  МПа ( $\bar{\sigma}_0 / \sigma_{0,2} = 1,952$ ); 3 —  $p_b = 13,8$  МПа ( $\bar{\sigma}_0 / \sigma_{0,2} = 2,142$ ))  
и на стадии разрушения (4 —  $p_b = 14,0$  МПа ( $\bar{\sigma}_0 / \sigma_{0,2} = 2,219$ ))



межутке  $0,002 \leq \bar{\varepsilon}_t \leq 0,25$  инвариантна относительно вида напряженного состояния;

диаграммы  $\bar{\varepsilon}^{vp} = \bar{\varepsilon}^{vp}(\bar{\sigma}^*)$  («вязкопластическая деформация — интенсивность неравновесных напряжений») существенно зависят от вида напряженного состояния;

вязкопластическая деформация при высоком уровне полной неупругой деформации соизмерима с мгновенной пластической деформацией, поэтому она должна приниматься во внимание при некоторых технологиях обработки металлов давлением.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белл, Дж.Ф.** Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Ч. 2: Конечные деформации [Текст] / Дж.Ф. Белл.— М.: Наука, 1984.— 431 с.
2. **Васин, Р.А.** Определяющие соотношения теории пластичности [Текст] / Р.А. Васин // Итоги науки и техники. Сер. МДТТ.— Т.21.— М.: ВИНИТИ, 1990.— С. 3—75.
3. **Пэжина, П.** Основные вопросы вязкопластичности [Текст] / П. Пэжина.— М.: Мир, 1968.— 176 с.
4. **Кузькин, А.Ю.** Испытание трубчатых образцов в условиях кольцевого растяжения [Текст] / А.Ю. Кузькин, Б.Е. Мельников, А.Г. Митюков, В.А. Попов // Гидротехническое строительство.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2007. № 5.— С. 77—78.
5. **Бессон, Ж.** Нелинейная механика материалов [Текст] / Ж. Бессон, Ж. Каэто, Ж.-Л. Шабош, С. Форест.— СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2010.— С. 307
6. **Новожилов, В.В.** Микронапряжения в конструкционных материалах [Текст] / В.В. Новожилов, Ю.И. Кадашевич.— Л.: Машиностроение, 1990.— 223 с.
7. **Рахматулин, Х.А.** О распространении плоских упругопластических волн [Текст] / Х.А. Рахматулин, Г.С. Шапиро // Прикладная математика и механика.— 1948. Т. 12. Вып. 4.— С. 369—374.
8. **Карман, Т.** Распространение пластических деформаций в телах [Текст] / Т. Карман, П. Дюве // Механика.— 1951. № 2.— С. 83—87.
9. **Соколовский, В.В.** Распространение упруговязкопластических волн в стержнях [Текст] / В.В. Соколовский // Прикладная математика и механика.— 1948. Т. 12. Вып. 3.— С. 261—280.
10. **Попов, В.А.** Установка для испытания тонкостенных трубчатых образцов в условиях объемного напряженного состояния [Текст] / В.А. Попов, А.Г. Митюков // Матер. научно-техн. конф. «Кораблестроительное образование и наука — 2003». — СПб.: Изд-во СПбГУН, 2003.— С. 423—428.
11. **Кузькин, А.Ю.** Об использовании гипотезы «единой» кривой при исследовании неустойчивости пластического деформирования [Текст] / А.Ю. Кузькин, Б.Е. Мельников, А.Г. Митюков, В.А. Попов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2006. № 6—1(48).— С. 85—88.
12. **Гигиняк, Ф.Ф.** Характеристики вязкопластичности теплоустойчивых сталей в условиях сложного напряженного состояния [Текст] / Ф.Ф. Гигиняк, О.К. Шкодзинский, А.А. Лебедев, Б.Т. Тимофеев // Проблемы прочности.— 1991. № 11.— С. 52—57.

УДК 621.791.14

*В.В. Башенко, К.А. Охапкин*

## ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА НА СТРУКТУРУ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Точечная сварка трением — перспективный процесс соединения пластичных металлов в твердой фазе. При точечной сварке трением значительно снижается осевое усилие на инструмент по сравнению с холодной точечной сваркой, что облегчает реализацию технологического процесса

(снижаются требования к оборудованию и оснастке). Она также имеет ряд преимуществ по сравнению со сваркой плавлением, благодаря отсутствию сварочной ванны с жидким металлом.

Точечная сварка трением позволяет выполнять нахлесточные соединения. Данный способ



особенно подходит для сварки цветных металлов и сплавов, обладающих хорошей пластичностью.

Цель нашей работы — выбор параметров режима точечной сварки трением, обеспечивающих минимальное снижение механических свойств основного металла, с учетом исследования влияния термического цикла сварки на структуру алюминиевых сплавов.

Для исследования был выбран деформируемый алюминиевый сплав АД 31, упрочняемый термической обработкой. Система легирования данного сплава: Al — 0,5 % Si — 0,7 % Mg. На примере данного материала можно разработать подход к выбору параметров режима точечной сварки трением ряда алюминиевых сплавов, принадлежащих к классу упрочняемых термической обработкой. Такой выбор должен обеспечивать получение свойств сварного соединения на уровне свойств основного металла.

Перед началом экспериментальных исследований сплав АД31 подвергали термообработке по стандартному режиму: закалка при 530 °C с охлаждение на воздухе + искусственное старение при 160 °C в течение 15 ч. Для эксперимента использовались образцы размером 40×25×3 мм.

Для изучения влияния термического цикла сварки на структуру и свойства сплава АД 31 были проведены экспериментальные исследования, которые заключались в проведении кратковременной термической обработки в печи с последующим охлаждением на воздухе. Тем самым имитировались циклы нагрева и охлаждения при сварке. Были выбраны три значения температуры в диапазоне от 300 до 450 °C, при которых могут происходить структурные изменения в сплаве АД 31. Температурно-временные условия термической обработки, имитирующей термические циклы сварки, представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Температурно-временные условия термической обработки сплава АД 31**

Температура нагрева, °C	Время прогрева, мин	Время выдержки, мин
300	1	10
375	1	10
450	1	10

После проведения термической обработки была исследована микроструктура и измерена микротвердость образцов. Данные, полученные в результате выполненных исследований, представлены в табл. 2.

**Таблица 2**  
**Результаты измерения микротвердости и содержания фазы Mg<sub>2</sub>Si в образцах из сплава АД31, подвергнутых термической обработке**

Температура нагрева, °C	Микротвердость, HV	Содержание фазы Mg <sub>2</sub> Si, % объемн.
Исходное состояние	65	7,1256
300	56	6,66
375	54	2,81
450	45	2,4

При нагреве до температур 300 и 375 °C наблюдается падение значений твердости соответственно на 9 и 11 единиц. Нагрев до температуры 450 °C приводит к снижению твердости на 20 единиц по сравнению с исходным состоянием, что является косвенным показателем большой степени разупрочнения сплава, т. е. недопустимого снижения служебных характеристик конструкционного материала.

Изменение свойств сплава при различных температурах нагрева объясняется растворением и изменением размеров вторичной упрочняющей фазы Mg<sub>2</sub>Si (см. табл. 2) [1].

Из анализа зависимости значений микротвердости от температуры нагрева (см. табл. 2) можно заключить, что нежелателен с точки зрения значительного снижения механических свойств сплава нагрев до температур, превышающих 375–400 °C. Следовательно, должны быть выбраны такие параметры режима сварки, которые обеспечили бы протекание процесса при условии ограничения этим интервалом максимальной температуры нагрева любой точки заготовки.

К основным конструктивно-технологическим параметрам режима точечной сварки трением можно отнести скорость вращения и диаметр инструмента. Для установления количественной связи значений конструктивно-технологических параметров режима сварки с температурно-времен-



ными условиями нагрева и охлаждения каждой точки заготовки использована физико-математическая модель, построенная на основе закона теплопроводности. При этом мощность источника теплоты вычисляется аналитически (без проведения предварительных экспериментальных исследований) и является выходным параметром модели.

Для решения задачи нестационарной теплопроводности возникает необходимость установить количественную зависимость мощности тепловыделения на поверхности фрикционного контакта инструмента и заготовок от конструктивно-технологических параметров режима сварки, а также выбрать граничные условия для корректной постановки краевой задачи.

Аналитическое выражение для вычисления удельной тепловой мощности имеет вид [2]

$$q(r) = \tau_T \omega \cdot r, \quad (1)$$

где  $\omega$  — угловая скорость вращения инструмента;  $\tau_T$  — сдвиговое сопротивление материала заготовки;  $r$  — расстояние от оси вращения инструмента до рассматриваемой элементарной площадки тепловыделения.

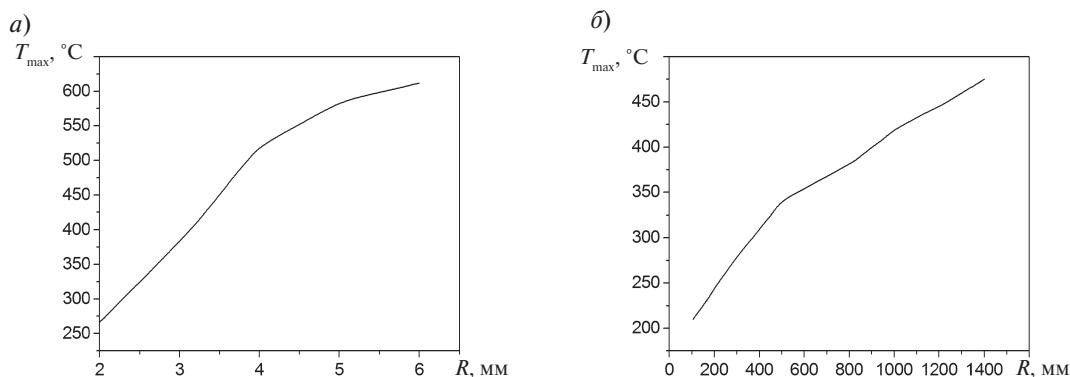
Необходимо учесть, что  $\tau_T$  зависит от температуры. Поэтому в процессе решения температурной задачи значение  $q$  корректируется на каждом шаге по времени с учетом распределения температур.

Построенная модель позволяет исходя из мощности источника теплоты и с учетом теплофизических свойств материала, геометрии заготовок, размеров инструмента и параметров режима сварки определять температуру в любой точке свариваемых заготовок в любой момент

времени. Решение уравнения теплопроводности осуществлялось методом конечных элементов с использованием программного комплекса COMSOL. Входные параметры модели принимались следующими: скорость вращения инструмента (при исследовании влияния диаметра инструмента на максимальную температуру) — 800 об/мин; диаметр инструмента (при исследовании влияния скорости вращения инструмента на максимальную температуру) — 6 мм; геометрические размеры заготовки — 40×25×3 мм. Время действия источника нагрева — 45 с, что несколько превышает продолжительность процесса сварки заготовок указанного размера и выбрано для получения консервативной оценки значений максимальных температур. Границы пластины были приняты адиабатическими. Результаты расчета максимальных температур в зависимости от радиуса и скорости вращения инструмента приведены на рис. 1.

На основе результатов экспериментальных исследований влияния температурно-временных условий нагрева на структуру и свойства сплава АД 31 была установлена критическая температура, при превышении которой резко изменяются свойства сплава — происходит значительное разупрочнение. Зависимости, представленные на рис. 1, показывают максимальную температуру, которая может быть достигнута в процессе точечной сварки трением. Они позволяют выбрать параметры режима сварки по критерию минимизации воздействия термического цикла сварки на структуру и свойства заготовок.

Так, чтобы обеспечить сохранения удовлетворительных значений свойств сплава АД 31, как



Расчетные значения максимальных температур в процессе точечной сварки трением в зависимости от радиуса инструмента (a) и скорости вращения инструмента (б)



показали экспериментальные исследования, температура в любой точке заготовки не должна превышать 400 °С (см. табл. 2). Учитывая эти данные, из анализа кривых на рисунке можно заключить, что при сварке заготовок толщиной 3 мм необходимо либо использовать инструмент, диаметр которого не превышает 6,2 мм при скорости вращения от 800 об/мин и ниже, либо при скорости вращения до 900 об/мин использовать инструмент диаметром от 6 мм и менее. Нижние пределы значений скорости вращения и диаметра инструмента должны быть выбраны исходя из условий достаточности нагрева зоны соединения для получения качественной сварной точки и необходимого пластифицирования металла заготовки в процессе погружения в нее инструмента.

Разработана расчетно-теоретическая методика количественной оценки влияния основных конструктивно-технологических параметров

режима сварки на температуры нагрева и охлаждения в каждой точке заготовки в любой момент времени.

Проведено экспериментальное исследование влияния температурно-временных условий нагрева заготовок из сплава АД 31, имитирующее термический цикл сварки, на их структуру и свойства. Показано, что нагрев в процессе сварки выше температуры 375–400 °С длительностью до 10 минут резко снижает механические свойства сплава.

Определены параметры режима точечной сварки трением, обеспечивающие минимальное изменение структуры и свойств сплава АД31Т1 в заготовках толщиной 3 мм в процессе сварки:

при скорости вращения инструмента, не превышающей 800 об/мин, диаметр инструмента должен быть менее 6,2 мм;

при диаметре инструмента до 6 мм скорость вращения не должна превышать 900 об/мин.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колачев, Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов [Текст] / Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, В.И. Елагин.— М.: Металлургия, 1981.— 416 с.

2. Охапкин, К.А. Расчетно — теоретический анализ тепловых процессов при точечной сварке трением [Текст] / К.А. Охапкин // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2012. № 1.— С. 172–176.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

УДК 621.45

А.Ю. Абакшин, Г.А. Ноздрин, М.И. Куклев

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В ЦИЛЛИНДРАХ ДВИГАТЕЛЯ С ВНЕШНИМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ

Ряд исследований, проводимых в настоящее время в области энергосбережения и использования нетрадиционных источников энергии, указывает на актуальность разработки, производства и применения двигателей с внешним подводом теплоты (ДВПТ), в том числе двигателей Стирлинга (ДС), в качестве преобразователей энергии в составе систем различного назначения. Это обуславливает необходимость проведения детального анализа рабочих процессов таких двигателей. Таким образом, все большую актуальность приобретают работы, связанные с исследованием процессов тепло- и массообмена во внутреннем контуре ДВПТ, имеющих определяющее влияние на все характеристики этих двигателей.

При исследовании процессов гидроаэродинамики и тепло- и массообмена в различных областях широко применяют различные методы численного моделирования. Общий характер процессов, происходящих во внутреннем контуре ДВПТ в процессе их работы, а также характеристики применяемых конструкционных материалов, рабочих тел, способов подвода и отвода теплоты указывают на большие возможности применения численных методов в исследованиях, связанных с этим типом двигателей.

В данной статье рассматривается опыт и результаты проведенных численных расчетов процессов тепло- и массообмена во внутреннем контуре ДВПТ. Решается задача численного моделирования процессов во внутреннем контуре ДС компоновочной модификации α. В качестве объекта исследования принят двухцилиндровый ДВПТ с прямым подводом и отводом теплоты через стенки соединительного канала.

Расчеты проводились на осесимметричной модели упрощенной геометрии. Диаметры горячего и холодного цилиндров были заданы равными 0,1 м, ходы обоих поршней — 0,15 м, общие высоты цилиндров двигателя составляли 0,2 м. Диаметр соединительного канала задавался равным 0,03 м, а его длина — 0,6 м. Частота рабочих циклов двигателя принята равной  $500 \text{ мин}^{-1}$ . В качестве рабочего тела принимался воздух. Задача решалась в осесимметричной нестационарной постановке в среде FLUENT.

Задача моделирования процессов во внутреннем контуре ДВПТ предполагает учет воздействия на рабочее тело поршней двигателя (изменение геометрии расчетной области в процессе численного расчета нестационарных процессов тепломассообмена). Для этого применялся специально составленный алгоритм для моделирования движения рабочего и вытеснительного поршней. Для дискретизации расчетной области в рабочих объемах цилиндров применялся метод наращивания слоев ячеек постоянной толщины. Максимальный размер расчетной сетки составил 9664 ячейки прямоугольной формы. При проведении расчетов шаг дискретизации по времени равнялся  $4,167 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ , что соответствует 0,125 градуса поворота коленчатого вала двигателя. На рис. 1 представлен вид расчетной сетки в начальный момент протекания рабочего процесса двигателя.

Для расчета полей скоростей и давлений в контуре применялись уравнения законов сохранения массы и момента импульса в осесимметричной постановке, а для расчета поля температур — уравнения закона сохранения энергии. Поле плотности рабочего тела рассчитывалось по уравнению состояния идеального газа.

Рис. 1. Вид расчетной сетки ( $\phi = 0^\circ$ )

В качестве начальных параметров были заданы давление рабочего тела в расчетной области, равное 1,5 МПа, и температура рабочего тела 921 К. Осевая скорость движения рабочего тела принята равной 1 м/с с целью ускорения сходимости на начальных этапах расчета.

При проведении численного расчета были заданы следующие граничные условия:

температура 1273 К участка стенки соединительного канала, через который осуществлялся подвод теплоты к рабочему телу;

температура 573 К участка стенки соединительного канала, через который осуществлялся отвод теплоты от рабочего тела;

на остальных стенах расчетной области было задано условие теплоизоляции;

в качестве граничного условия для решения уравнения закона сохранения момента импульса применялось условие прилипания на всех стенах расчетной области.

Приведем тексты модулей, применявшихся для задания законов движения поршней цилиндров.

Для задания закона движения поршня горячего цилиндра:

```
#include «udf.h»
#include «math.h»
```

```
DEFINE(CG_MOTION(pistonfrono, dt, vel,
omega, time, dtime)
{
    vel[0] = 4.7419*(sin((16.665*time*3.1415)-
(3.1415/2)))*1.78227*15.1255/32;
}
```

Для задания закона движения поршня холодного цилиндра:

```
#include «udf.h»
#include «math.h»
```

```
DEFINE(CG_MOTION(pistonfromo, dt, vel,
omega, time, dtime)
{
    vel[0] = -4.7419*(sin(16.665*time*3.1415))*
1.78227*15.1255/32;
}
```

Параметры рабочего цикла двигателя были заданы в соответствии с предварительными расчетами, проведенными по методу Шмидта [2–4].

С целью минимизации влияния начальных параметров на результаты расчета было проведено моделирование 20 полных циклов работы двигателя.

В результате расчета получены поля скоростей, давлений, температур во внутреннем контуре ДВПТ, данные об их изменениях в течении всего цикла работы двигателя.

Проверочные расчеты, проводившиеся на расчетных сетках размерностью 4830, 2416, 14496 и 19329 ячеек, показали сеточную независимость полученных результатов на расчетных сетках размерностью 9664 ячейки и выше. Проводились также проверочные расчеты на сетке размерностью 9664 ячейки с шагом по времени 0,0625 и 0,25, 0,5 градуса поворота коленчатого вала. Расчеты показали независимость полученных результатов от дискретизации по времени.

Полученные данные о характеристиках работы ДВПТ в значительной мере расходятся с данными как аналитических расчетов [2–4], так и численного моделирования с использованием иных методик и расчетной сетки [1]. Это может быть связано с большей точностью описания процессов с помощью численного расчета по сравнению с аналитическим, с одной стороны, а также с меньшей точностью примененного метода численного расчета, с другой. При этом характер полученных полей термодинамических параметров в значительной мере схож с данными численных расчетов [1], что позволяет сделать вывод о допустимости описания процессов во внутреннем контуре ДВПТ при помощи примененной методики.

Следует также отметить, что полученные результаты были сопоставлены с данными аналитических расчетов по методам, разрабатываемым лабораторией ДВПТ кафедры ДВС СПбГПУ. Сопоставление показало удовлетворительное совпадение результатов по характеру изменения

Рис. 2. Векторное поле скоростей рабочего тела в контуре в период горячего дутья ( $\phi = 0^\circ$ )

давления рабочего тела и величины массового расхода рабочего тела через соединительный канал, а также по результатам расчета плотности рабочего тела в контуре.

Некоторые результаты проведенных расчетов приведены на рис. 2, 3.

имного влияния процессов теплообмена в контуре и характера течения рабочего тела.

Основными задачами по улучшению методики численного моделирования процессов тепло-массообмена во внутреннем контуре ДВПТ являются моделирование с удовлетворительной

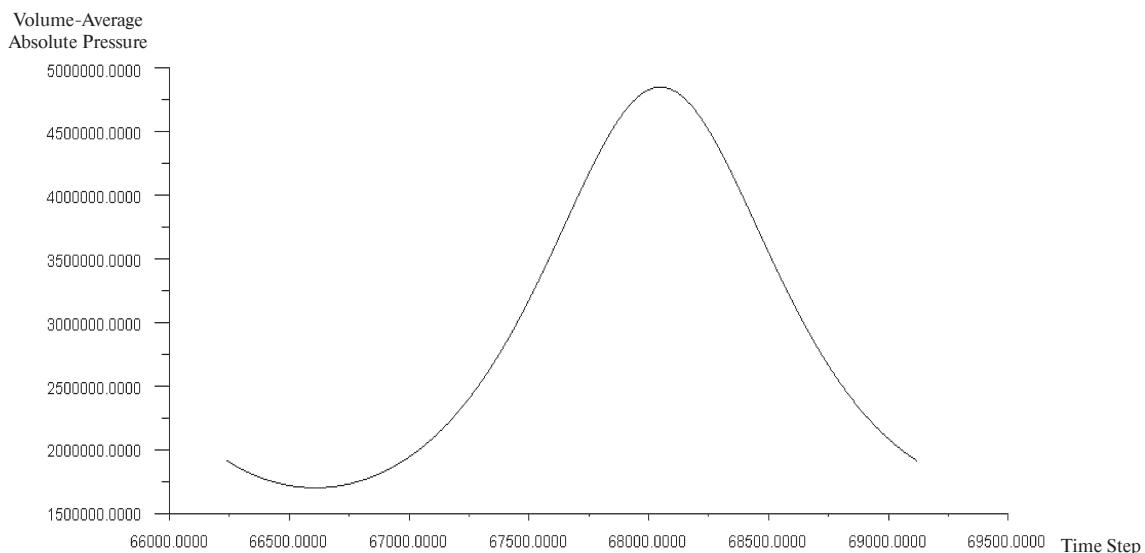


Рис. 3. График изменения осредненного по объему расчетной области давления рабочего тела за цикл

Проведенные расчеты позволяют сделать выводы о характере течения рабочего тела во внутреннем контуре ДВПТ и влиянии конструкции и частоты рабочих циклов двигателя на процессы тепломассообмена в контуре. Проведение расчетов подобными методами дает возможность оценивать влияние конструкции двигателя и конфигурации его внутреннего контура, а также частоты рабочих циклов на протекание рабочего процесса и характеристики ДВПТ, что позволяет использовать полученные результаты для оптимизации конструкции ДВПТ. Важным результатом является возможность оценки вза-

точностью работы регенератора и повышение точности моделирования процессов теплообмена.

Предлагается использовавшиеся при проведении расчетов методы применять в дальнейшем при численных расчетах внутреннего контура ДВПТ. На момент публикации данного материала проводилась работа по подготовке физических экспериментов для верификации полученных данных. Планируется использование полученных результатов для выработки рекомендаций по оптимизации конструкции ДВПТ, а также методов расчета и анализа рабочих процессов двигателей данного типа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dyson, R. Fast Whole-Engine Stirling Analysis [Текст] / R. Dyson, S. Wilson, R. Tew, R. Demko //

Third International Energy Conversion Engineering Conference.— 2005— 35 с.



2. **Уокер, Г.** Двигатели Стирлинга [Текст] / Г. Уокер.— М.: Машиностроение, 1985.— 401 с.

3. **Ридер, Г.** Двигатели Стирлинга [Текст] / Г. Ридер, Ч. Хупер.— М.: Мир, 1986.

4. **Бреусов, В.П.** Двигатель внешнего подвода тепла (вчера, сегодня, завтра) [Текст] / В.П. Бреусов.— СПб.: Нестор, 2007.— 156 с.

УДК 620.92

*B.B. Чемеков*

## ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ ТЕПЛОВОГО НАСОСА

Оптимизация параметров систем автономного теплоснабжения, построенных на оборудовании возобновляемой энергетики, — крайне важный этап их создания, обеспечивающий наилучшие технико-экономические характеристики и параметры функционирования. При этом возникает задача построения математической модели исследуемой системы. Для этого предлагаются методика, основанная на использовании уравнений, описывающих особенности выработки, преобразования и аккумулирования тепловой и электрической энергии.

На рис. 1 представлена схема системы автономного теплоснабжения, которая разработана

для демонстрационного индивидуального жилого дома, расположенного на Черноморском побережье Краснодарского края [1].

Основным теплогенератором в системе служит тепловой насос типа «воздух — вода». Вырабатываемая им тепловая энергия аккумулируется в емкостном водонагревателе системы горячего водоснабжения и буферной емкости системы отопления. Солнечный коллектор используется для приготовления горячей воды и дополнительно для догрева низкотемпературного теплоносителя перед испарителем теплового насоса. Электропитание компрессора теплового насоса осуществляется от собственной электри-

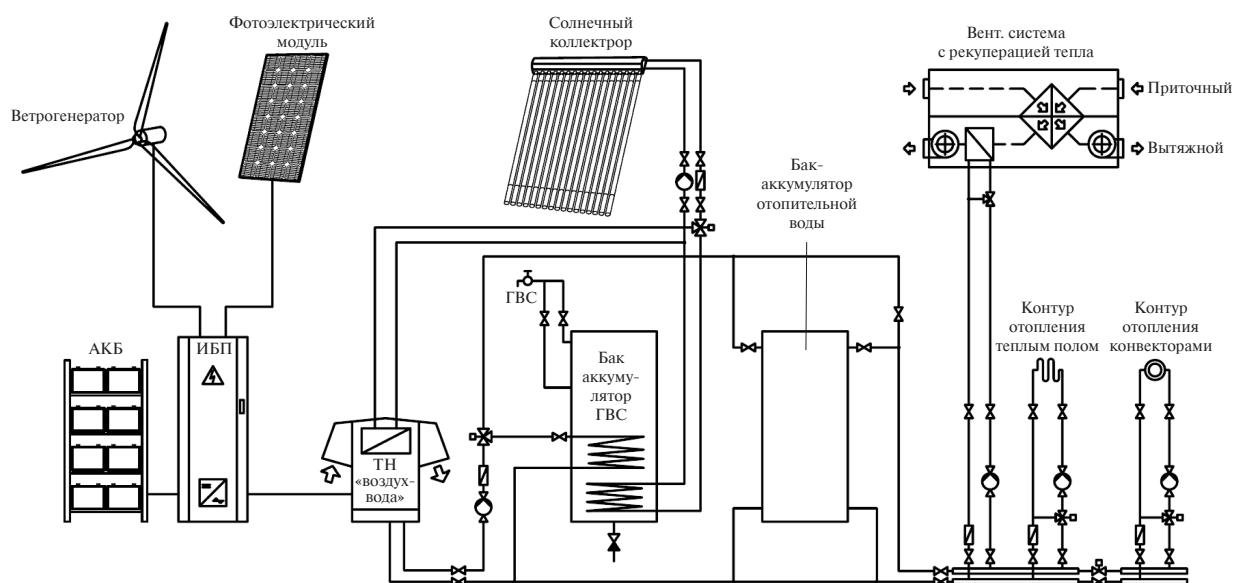


Рис. 1. Схема системы автономного теплоснабжения на базе теплового насоса



ческой системы, в которую входит ветроэлектрическая установка, солнечные фотоэлектрические модули, аккумуляторные батареи, а также контролирующий модуль с функцией источника бесперебойного питания. В качестве нагревательных приборов во всех помещениях жилого дома используются теплые полы и конвекторы. Вентиляционная система с рекуперацией тепла вытяжного воздуха обеспечивает требуемый воздухообмен с минимальными теплопотерями.

Определив компоненты системы автономного теплоснабжения, необходимо проанализировать основные уравнения, описывающие особенности преобразования энергии возобновляемых источников в тепловую и электрическую энергию, а также особенности ее аккумулирования.

Детальная математическая модель теплового насоса достаточно сложна, поэтому для моделирования предложено использовать известную зависимость теплопроизводительности  $q_{wp}$  и коэффициента преобразования теплового насоса  $\varepsilon$  от температур испарения и конденсации [2]:

$$q_{wp} = f(T_i, T_k); \quad \varepsilon = f(T_i, T_k), \quad (1)$$

где  $T_i$ ,  $T_k$  — температура в испарителе и конденсаторе ТН.

Эти зависимости даны в техническом паспорте теплового насоса [3] в виде рабочих характеристик, полученных экспериментальным путем. По такой характеристике, зная величину температуры воздуха, проходящего через испаритель ТН, и температуру конденсации, можно определить коэффициент преобразования и соответственно теплопроизводительность ТН в любой момент времени. Суммируя значения теплопроизводительности за определенный интервал  $\Delta t$ , получим величину вырабатываемой тепловой энергии.

Коэффициент преобразования ТН  $\varepsilon$  характеризует отношение полезной тепловой мощности  $q_{wp}$ , получаемой при температурах  $T_i$ ,  $T_k$  и отводимой потребителю, к электрической мощности, затрачиваемой на привод компрессора ТН. Используя это соотношение, можно определить текущее значение потребляемой компрессором мощности  $p_{wp}$ , кВт:

$$p_{wp} = q_{wp} / \varepsilon \quad (2)$$

Для построения модели системы теплоснабжения с солнечными коллекторами можно использовать уравнение теплового баланса, учи-

тывающее влияние климатических параметров. Тогда полезная тепловая энергия  $Q_u$  коллектора площадью  $A_c$  определяется разностью между абсорбированным солнечным излучением и тепловыми потерями в окружающую среду [4]:

$$Q_u = A_c [I\eta_o - U_L (T_{pm} - T_a)] = mC_p (T_0 - T_i), \quad (3)$$

где  $A_c$  — площадь поверхности коллектора, м<sup>2</sup>;  $I$  — плотность потока солнечной радиации, поступающей на поверхность коллектора, Вт/м<sup>2</sup>;  $\eta_o$  — эффективный оптический КПД коллектора;  $U_L$  — общий коэффициент теплопотерь коллектора, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_{pm}$  — средняя температура абсорбера, °C;  $T_0$  и  $T_i$  — температура теплоносителя на выходе и на входе коллектора, °C;  $T_a$  — температура наружного воздуха, °C;  $m$  — массовый расход теплоносителя через коллектор, кг/с;  $C_p$  — удельная изобарная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·°C).

Солнечный коллектор вырабатывает максимальное количество полезной энергии, когда температура всего коллектора равна температуре теплоносителя на его входе, при этом потери тепла в окружающую среду минимальны. Тогда формулу полезной тепловой энергии удобно представить как функцию температуры теплоносителя на входе в коллектор с учетом коэффициента  $F_R$  как эквивалента эффективности стандартного теплообменника:

$$Q_u = A_c F_R [I\eta_o - U_L (T_i - T_a)]. \quad (4)$$

Солнечный коллектор работает в паре с баком-аккумулятором, тепловая емкость которого определяется по выражению

$$Q_{sw} = (mC_p) \Delta T_s, \quad (5)$$

где  $Q_{sw}$  — общая тепловая емкость бака-аккумулятора для всего рабочего температурного диапазона  $\Delta T_s$ ;  $m$  — масса теплоносителя в баке, кг;  $C_p$  — удельная теплоемкость теплоносителя в баке-аккумуляторе, Дж/кг·°C.

Баланс тепловой энергии в аккумуляторе с однородной температурой во всем объеме определяется уравнением [4]

$$Q_{sw} = Q_u - Q_{dhw} - \Delta Q_{uas}, \quad (6)$$

где  $Q_u$  и  $Q_{dhw}$  — показатели пополнения и удаления энергии аккумулятора, кДж;  $T_s$  — температура в баке-аккумуляторе, °C;  $\Delta Q_{uas}$  — потери тепла из бака, кДж.



Аналогично можно записать уравнение баланса для буферной емкости системы отопления с учетом, что поступление тепла в бак определяется величиной  $Q_{wp}$  теплопроизводительности ТН, а потребление тепла из бака — величиной  $Q_h$  теплопотребления в системе отопления:

$$Q_{sh} = Q_{wp} - Q_h - \Delta Q_{uas}. \quad (7)$$

Теперь рассмотрим детально водо-воздушный теплообменник, используемый в системе для догрева низкопотенциального теплоносителя. Уравнение баланса энергии на входе и выходе теплообменника имеет вид

$$\begin{aligned} (mC_p)_c (T_{co} - T_{ci}) = \\ = (L\rho C_p)_a (T_{ai} - T_a), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $T_{co}$  — температура теплоносителя на входе в теплообменник (выходе коллектора);  $T_{ci}$  — температура на выходе из теплообменника (входе коллектора);  $L_a$  — объемный расход воздуха через теплообменник,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $C_{pa}$  — удельная теплопроводность воздуха,  $\text{Дж}/\text{кг}\cdot^\circ\text{C}$ ;  $\rho_a$  — объемная плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $T_{ai}$  — температура воздуха на выходе из теплообменника.

Учитывая показатель относительного перепада температур  $\Theta_t$  как величину теплотехнической эффективности нагрева наружного воздуха при его постоянном влагосодержании в теплообменнике, можно записать производительность водо-воздушного теплообменника в виде

$$Q_{pxc} = \Theta_t (mC_p) (T_{co} - T_a). \quad (9)$$

В конечном счете уравнение для системы с солнечным коллектором и дополнительным водо-воздушным теплообменником, встроенным перед испарителем ТН, при условии оптимального фиксированного расхода через коллектор можно записать в виде

$$\begin{aligned} A_c F'_R [I\eta_0 - U_L (T_{co} - T_a)] = \\ = \Theta_t (L\rho C_p)_a (T_{ai} - T_a), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $F'_R$  — модифицированный показатель массового расхода теплоносителя.

Потерей энергии в каналах и трубах, ведущих к солнечному коллектору, можно пренебречь,

так как она незначительна по сравнению с суммарной энергией, вырабатываемой в системе.

Величину вырабатываемой ВЭУ энергии за определенный интервал можно определить, используя экспериментальную кривую мощности и среднечасовые величины скорости ветра в течение года [5]:

$$W_{wind} = T \int_{v_{p\min}}^{v_{p\max}} p(v) f(v) dv, \quad (11)$$

где  $T$  — расчетный интервал, ч;  $p(v)$  — мощностная характеристика ВЭУ;  $f(v)$  — функция плотности распределения ветра по скоростям за расчетный интервал времени;  $v_{p\min}$ ,  $v_{p\max}$  — начальная и конечная рабочая скорость ВЭУ.

Величина электроэнергии, вырабатываемой фотоэлектрическими модулями, определится выражением

$$W_{pv} = \int_{t=1}^T P_i(t) dt. \quad (12)$$

Уравнение баланса электроэнергии для любого электрохимического аккумулирующего устройства можно записать в виде

$$w' = w_0 + \int_0^t w_{gen} dt - \eta_e \int_0^t w_{load} dt, \quad (13)$$

где  $w'$  — количество энергии в аккумуляторе к моменту времени  $t$ ,  $\text{kВт}\cdot\text{ч}$ ;  $w_0$  — количество энергии в начальный момент времени  $t = 0$ ,  $\text{kВт}\cdot\text{ч}$ ;  $w_{gen}$ ,  $w_{load}$  — выработка электроэнергии источником и ее потребление за период времени  $\Delta t$ ,  $\text{kВт}\cdot\text{ч}$ ;  $\eta_e$  — коэффициент, учитывающий КПД инвертора ( $\eta_e = 1,2$ ).

Количество ампер-часов, требуемое для покрытия нагрузки переменного тока, определяется выражением

$$E = W' / U_e, \quad (14)$$

где  $U_e$  — значение входного напряжения инвертора.

На основе рассмотренных уравнений можно построить математическую модель, описывающую взаимосвязь между всеми переменными исследуемой системы. Для наглядности описания ее можно представить в виде структуры, изображенной на рис. 2.

Структура решаемой задачи в упрощенном виде включает:

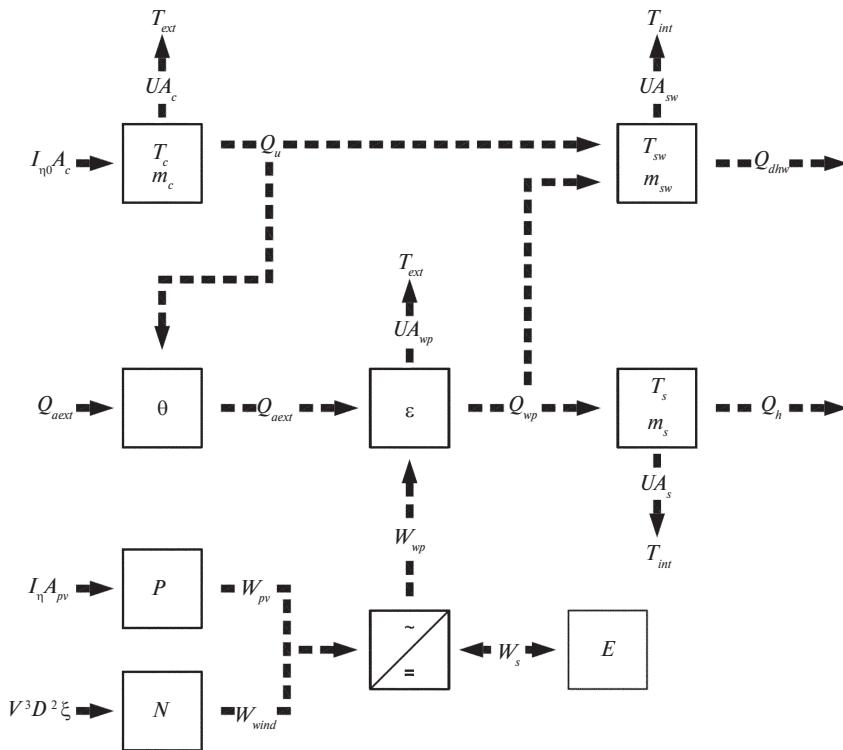


Рис. 2. Структурная схема модели системы автономного теплоснабжения

уравнения генерируемой, потребляемой и аккумулируемой тепловой энергии

$$\begin{aligned}
 q_{gen}(t) &= q_{wp}(t) + q_c(t) + q_{eh}(t); \\
 q_{load}(t) &= q_h(t) + q_{dhw}(t); \\
 q_{load}(t) &= q_{gen}(t) \pm q_s(t);
 \end{aligned} \tag{15}$$

уравнения генерируемой, потребляемой и аккумулируемой электрической энергии

$$\begin{aligned}
 w_{gen}(t) &= w_{wind}(t) + w_{pv}(t); \\
 w_{load}(t) &= w_{wp}(t) + w_{eh}(t); \\
 w_{load}(t) &= w_{gen}(t) \pm w_s(t).
 \end{aligned} \tag{16}$$

Подставляя в (15) уравнения для теплогенерирующих и теплоаккумулирующих элементов системы, получим условие баланса тепловой мощности системы:

$$\begin{aligned}
 q_h(t) + q_{dhw}(t) &= \\
 &= q_{wp}(t) + q_{eh}(t) + A_c F_R [I(t) \eta_o - U_L (T_i - T_a)] \pm
 \end{aligned}$$

$$\pm (mC_p)_s \frac{dT_s}{dt} \pm (mC_p)_{sw} \frac{dT_{sw}}{dt}. \tag{17}$$

В левой части уравнения первое слагаемое — теплопотребление на отопление и вентиляцию, второе — теплопотребление на ГВС. В правой части уравнения первое слагаемое — теплопроизводительность ТН, второе — теплопроизводительность ТЭН, третье — теплопроизводительность СК, четвертое — аккумулирование тепла в буферной емкости отопления, пятое — аккумулирование в емкостном водонагревателе.

Аналогично, подставляя в (16) уравнения, описывающие электрогенерирующие установки и электрохимический аккумулятор, получим условие баланса электрической мощности системы:

$$\begin{aligned}
 w_{wp}(t) + w_{eh}(t) &= \\
 &= 4,81 \cdot 10^{-4} D^2 \nu(t)^3 \xi \eta + \\
 &+ I(t) A_{pv} \eta \pm E(t) U_{inv} \eta_{inv}.
 \end{aligned} \tag{18}$$

В левой части уравнения первое слагаемое — электропотребление теплового насоса, второе —



электропотребление дублирующего теплоэлектро-нагревателя. В правой части уравнения первое слагаемое — электроэнергия, вырабатываемая ВЭУ, второе — электроэнергия, вырабатываемая ФЭМ, третье — аккумулирование электроэнергии.

Используя зависимость теплопроизводительности  $q_{wp}$  и электропотребления от коэффициента преобразования теплового насоса  $\varepsilon$  (2) основную систему уравнений представим следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} q_h(t) + q_{dhw}(t) = q_{wp}(t) + q_{eh}(t) + \\ \quad + A_o F_R [I(t) \eta - a U (T - T_s)] \pm \\ \quad \pm (m C_p)_s \frac{dT_s}{dt} \pm (m C_p)_{sw} \frac{dT_{sw}}{dt}; \\ w_{wp}(t) + w_{eh}(t) = 4,81 \cdot 10^{-4} D^2 v(t)^3 \xi \eta + \\ \quad + I(t) A_{pv} \eta \pm E(t) U_{\text{инв}} \eta_{\text{инв}}; \\ q_{wp}(t) = \varepsilon w_{wp}(t). \end{array} \right. \quad (19)$$

С помощью разработанной модели определены оптимальные параметры исследуемой системы автономного теплоснабжения с учетом максимума эффективности использования

и минимума капитальных затрат на оборудование [6, 7]. В качестве исходных данных при моделировании использовались метеорологические параметры, полученные автором в ходе мониторинга [8]. Получены величины вырабатываемой, потребляемой, аккумулируемой тепловой и электрической энергии, а также различные параметры работы оборудования за каждый час. В качестве примера на рис. 3 приведен график потребляемой электроэнергии для ТН и электронагревателя.

Экспериментальные исследования, выполненные для проверки адекватности представленной модели, проведены в климатических условиях Краснодарского края. Графики (рис. 4) электроэнергии, потребляемой ТН и электронагревателем, а также другие рабочие характеристики получены с использованием разработанной автором автоматизированной измерительной системы [9].

Близкое совпадение рабочих характеристик системы автономного теплоснабжения, полученных при моделировании (рис. 3) и в ходе эксперимента (рис. 4), наглядно свидетельствуют об адекватности представленной модели.

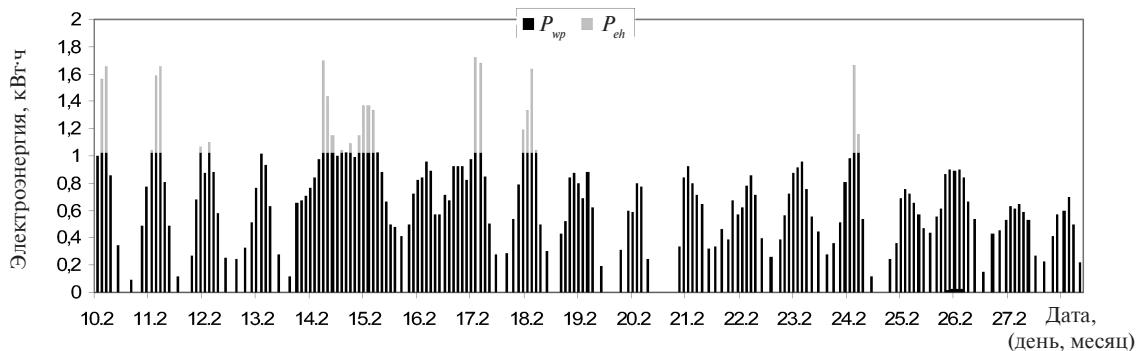


Рис. 3. График потребляемой электрической энергии, полученный по результатам моделирования

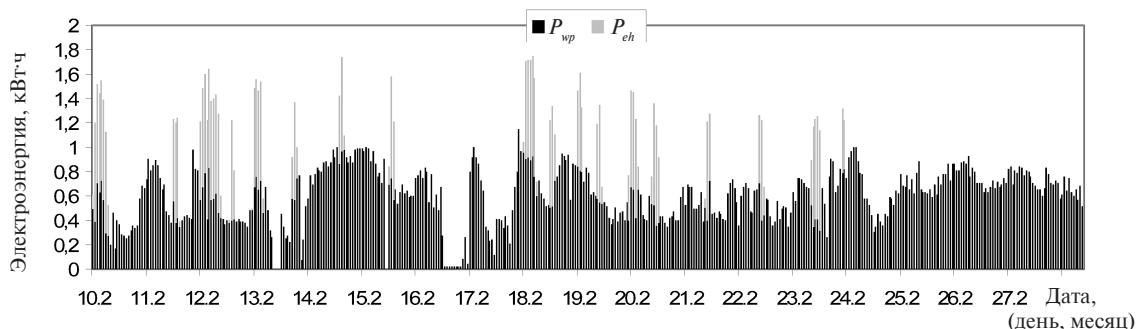


Рис. 4. График параметров электропотребления, полученный при измерениях

Использование предлагаемой математической модели для предпроектной оценки систем автономного теплоснабжения дает широкие воз-

можности для конкурентоспособного развития возобновляемой энергетики, особенно в регионах с дефицитом генерирующих мощностей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент России № 2382281. Система автономного теплоснабжения и холодоснабжения зданий и сооружений [Текст] / Д.С. Стребков, В.В. Харченко, В.В. Чемеков // Опубл. 2010.— Бюл. №5.
2. VITOCAL 300/350. Тепловые насосные установки Viessmann. [Текст]: Инструкция по проектированию / Viessmann Werke GmbH&Co.— 2004.— 96 с.
3. VITOCAL 300 Luft/Wasser Wärmepumpe 5,4 bis 14,6 kW. Datenblatt. Technische Änderungen vorbehalten [Текст] / Viessmann Werke GmbH&Co.— 2002.— 12 s.
4. Duffie, J.A. Solar engineering of thermal processes [Текст] / J.A. Duffie, William A. Beckman.— 2nd ed.— Wiley, John & Sons, Incorporated, 1991.— 918 p.
5. Chemekov, V.V. Modelling of autonomous heating, ventilating and air conditioning system based on the heat pump and wind turbine [Текст] / V.V. Chemekov, V.V. Kharchenko, V. Adomavicius // Proc. of the 6th international conference on electrical and control technologies «ECT-2011».— Kaunas: Lithuania, 2011.— P. 307—310.
6. Чемеков, В.В. Оценка эффективности применения тепловых насосов типа «воздух—вода» для теплоснабжения индивидуальных жилых домов в климатических условиях Краснодарского края [Текст] / В.В. Чемеков // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: Тр. 7-й Междунар. научно-техн. конф. Часть 4: Возобновляемые источники энергии. Местные энергоресурсы. Экология.— М.: Изд-во ГНУ ВИЭСХ, 2010.— С. 293—298.
7. Харченко, В.В. Теплоснабжение дома от теплонасосной системы, использующей возобновляемые источники энергии [Текст] / В.В. Харченко, В.В. Чемеков, П.В. Тихонов, В.Б. Адомавичюс // Lietuvos taikomųjų mokslo akademijos mokslo darbai. Tarpautinis inovacinių taikomųjų mokslo darbų žurnelas (Научные труды Академии прикладных наук Литвы. Междунар. инноваций. журнал прикладных научных трудов).— Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla.— 2011. № 3.— P. 45—52.
8. Чемеков, В.В. Измерение метеорологических данных для проектирования систем энергоснабжения на основе ВИЭ [Текст] / В.В. Чемеков // Возобновляемые источники энергии. Матер. шестой Всеросс. науч. молодеж. шк. Часть 2. (Москва, 25—27 нояб. 2008 г.).— Москва, 2008.— С. 121—126.
9. Multipurpose measuring complex for continuous monitoring of RES based power systems [Текст] // Proc. of the 6th intern. conf. on electrical and control technologies «ECT-2011» Kaunas, Lithuania, 2011.— P. 311—316.

УДК 623.983:531(075.8)

*T.B. Антощенко, A.B. Бородкин, B.C. Мамутов*

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИКО-ИМПУЛЬСНОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ТОНКОЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОВ ПОДВИЖНОЙ СРЕДОЙ

Штамповка подвижными средами характеризуется применением только одного жесткого рабочего инструмента, а в качестве второго инструмента используется подвижная среда — магнитное поле, газ, жидкость, резина, полиуретан, мягкий металл и т. п. Методы штамповки подвижными средами эффективны в условиях мелкосерийного производства деталей из тонколистовых материалов и фольги. Однако не всегда

удается получить требуемое качество детали. Часто при статической, а точнее — квазистатической, штамповке подвижными средами алюминия и алюминиевых сплавов на кривошипных и гидравлических прессах происходит гофрообразование, неполное заполнение заготовкой рельефа матрицы и нарушение сплошности материала, что приводит к браку. На сложность проектирования подобных процессов может



оказывать влияние анизотропия листового металла. Особенно это характерно для деталей, имеющих сложный в плане рельеф. При импульсной штамповке можно достичь уменьшения пружинения и повышения точности, но за счет конечной скорости распространения пластических волн в материале заготовки возможна локализация пластических деформаций и разрушение заготовки.

Для изготовления подобных деталей эффективно комбинирование статического и импульсного нагружений. Однако определить априорно параметры такого нагружения достаточно сложно. Поэтому проектирование комбинированных процессов требует предварительных расчетов. Одним из немногих конечно-элементных комплексов, позволяющих использовать модели оболочек и рассчитывать одновременно параметры квазистатического и импульсного нагружений, является программный комплекс LS-DYNA 970.

Целью нашей работы была разработка методики компьютерного расчета статико-импульсной вытяжки-формовки ортотропных тонколистовых металлов подвижной средой с применением конечно-элементного программного комплекса LS-DYNA 970.

### Магнитно-эластоимпульсная технология статико-импульсной вытяжки-формовки особо тонколистовых металлов

Один из наиболее эффективных методов статико-импульсного нагружения — это использование технологического устройства для магнитно-эластоимпульсной штамповки (МЭИШ) (рис. 1). Принцип работы устройства заключается в следующем. Заготовка из тонколистового материала 5 устанавливается на формовочную матрицу 4 и помещается в контейнер 7 с подвижной средой 6, в качестве которой чаще всего используется полиуретан. Матрица примыкает к подвижному элементу 3, выполненному из материала с высокой электропроводностью. Торец подвижного элемента расположен над спиралью плоского индуктора 2, подключенного к зажимам магнитно-импульсной установки 1. Все устройство расположено между верхней и нижней плитами механического прижима 8. Усилия механического прижима достаточно для статической вытяжки-формовки заготовки по профилю матрицы.

С использованием данного технологического устройства возможны три варианта осуществления процесса штамповки:

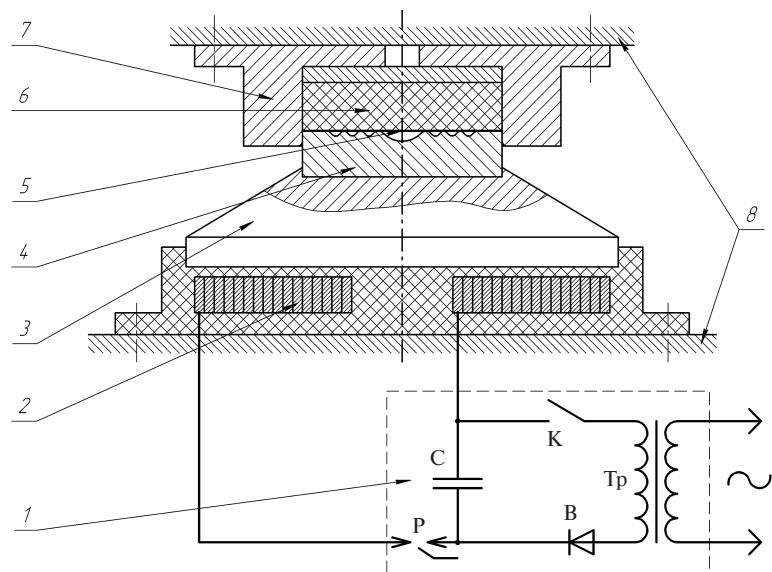


Рис. 1. Схема технологического устройства для магнитно-эластоимпульсной штамповки:

1 — магнитно-импульсная установка ( $C$  — конденсаторная батарея,  $P$  — управляемый разрядник,  $B$  — выпрямитель,  $Tr$  — повышающий трансформатор), 2 — плоский спиральный индуктор, 3 — подвижный элемент из материала с высокой электропроводностью, 4 — формовочная матрица, 5 — листовая заготовка, 6 — полиуретан, 7 — контейнер, 8 — верхняя и нижняя плиты гидравлического пресса

1) статическая штамповка за счет усилия механического прижима при смыкании верхней и нижней плит 8;

2) незначительный прижим для выборки зазоров за счет перемещения плит 8 и импульсное нагружение заготовки, когда при разряде конденсаторной батареи С магнитно-импульсной установки 1 на спиральный индуктор 2 импульсное магнитное поле воздействует на подвижный элемент 3, перемещает его, и заготовка 5 деформируется импульсным давлением, возникающим в подвижной среде 6;

3) статико-импульсное нагружение, когда осуществляется комбинирование вариантов 1 и 2.

Давление в эластичной среде при МЭИШ, действующее на деформируемую заготовку, близко по форме к положительной полуволне синусоиды [2]:

$$p = p_0 \sin(\pi t / T_0) \text{ при } t \leq T_0; \quad p = 0 \text{ при } t > T_0,$$

где  $p_0$  — амплитуда;  $T_0$  — длительность давления. Такая форма импульсного давления задавалась при компьютерных расчетах.

Статическое давление задавалось меняющимся по линейному закону:

$$p = p_{0s} (t / T_{0s}) \text{ при } t \leq T_{0s}; \quad p = 0 \text{ при } t > T_{0s},$$

где  $p_{0s}$  — амплитуда давления при статическом нагружении,  $T_{0s}$  — длительность статического давления. При компьютерных расчетах нет необходимости задавать реальное время нагружения, достигающее величины 5–20 с. Это значительно увеличивает время счета. Можно ограничиться некоторым условным временем, когда динамическое решение задачи с необходимой для расчетов точностью сойдется к решению статической задачи. Сходимость динамического решения к статическому в значительной степени определяется параметром безразмерного времени нагружения [3]

$$\eta = T_{0s} (B/\rho)^{0.5} / R,$$

где  $R$  — радиус характерного участка заготовки, для которого требуется обеспечить такую сходимость;  $\rho$  — плотность материала заготовки;  $B$  — параметр степенного закона упрочнения металла. В работе [3] также установлено, что для формообразующих операций листовой штамповки при величинах  $\eta > 3$ –5 различие статического и динамического решений по величине интенсивности тензора логарифмических де-

формаций в среднем и по максимуму становится менее 3–10 %.

### Компьютерное моделирование процесса формоизменения заготовки

Сделан расчет вытяжки-формовки детали «мембрана» из алюминиевого сплава АМг3-М толщиной 0,5 мм. Диаметр заготовки и диаметр внешнего контура матрицы составлял 120 мм. Особенность формы матрицы и, соответственно, штампаемой детали — наличие трех кольцевых рифтов и центральной сферической полости. Для уменьшения времени расчета использовалась геометрическая модель, полученная вращением на 90° контура образующей матрицы (рис. 2).

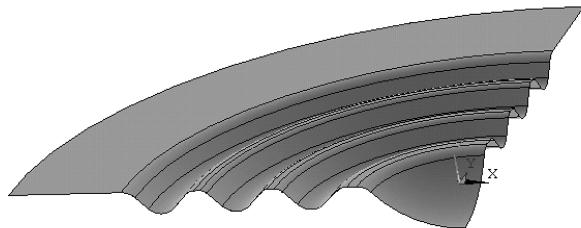


Рис. 2. Оболочечная модель матрицы с учетом плоскостей симметрии

Расчет проводился с учетом анизотропии материала заготовки. Задавались показатели пластической анизотропии по Ланкфорду:  $R_{00} = 0,538$ ;  $R_{45} = 0,706$ ;  $R_{90} = 0,471$ . В качестве модели материала использовалась трехпараметрическая анизотропная модель Барлата. Принят степенной закон зависимости напряжения текучести  $\sigma_s$  от интенсивности тензора логарифмической деформации  $\varepsilon_i$ :  $\sigma_s = B \varepsilon_i^m$  с параметрами  $B = 345$  МПа,  $m = 0,25$ .

Рассмотрены варианты нагружения: линейно меняющееся квазистатическое давление; импульсное давление в форме положительной полуволны синусоиды с длительностями  $T_0 = 80$  мкс и  $T_0 = 320$  мкс; комбинированное давление — сначала линейно меняющееся квазистатическое, а затем импульсное с длительностями  $T_0 = 80$  мкс и  $T_0 = 320$  мкс. Оценка  $T_{0s}$  осуществлялась по величине радиуса в плане центральной полости  $R = 15$  мм.

Квазистатический вариант нагружения приводил к разрушению заготовки и большим упругим пружинениям в центральной сферической полости — после снятия нагрузки заготовка



отходила от полости матрицы в центре более чем на 1 мм. Поэтому данный вариант расчета в статье не приводится.

На рис. 3 представлены диаграммы предельных деформаций Келера — Гудвина для импульсного и комбинированного вариантов нагрузки.

Первая главная деформация находится по вертикальной оси, по горизонтальной оси — вторая главная деформация. Верхняя кривая соответствует началу физического разрушения, нижняя кривая лежит примерно на 20 % ниже и определяет начало деструкционной пластичности.

Параметры деформированного состояния точек заготовки совместно с диаграммами разрушения Келера — Гудвина дают возможность оценить разрушение и складкообразование заготовки. Видно, что «чисто» импульсное нагружение (см. рис. 3, а, б) приводит к потере сплошности материала заготовки. Варианты комбинированного квазистатико-импульсного нагружения (см. рис. 3, в, г) позволяют осуществить деформирование без разрушения заготовки. Так как предельные деформации условно взяты одинаковые для всех вариантов, то положительный эффект комбинированного де-

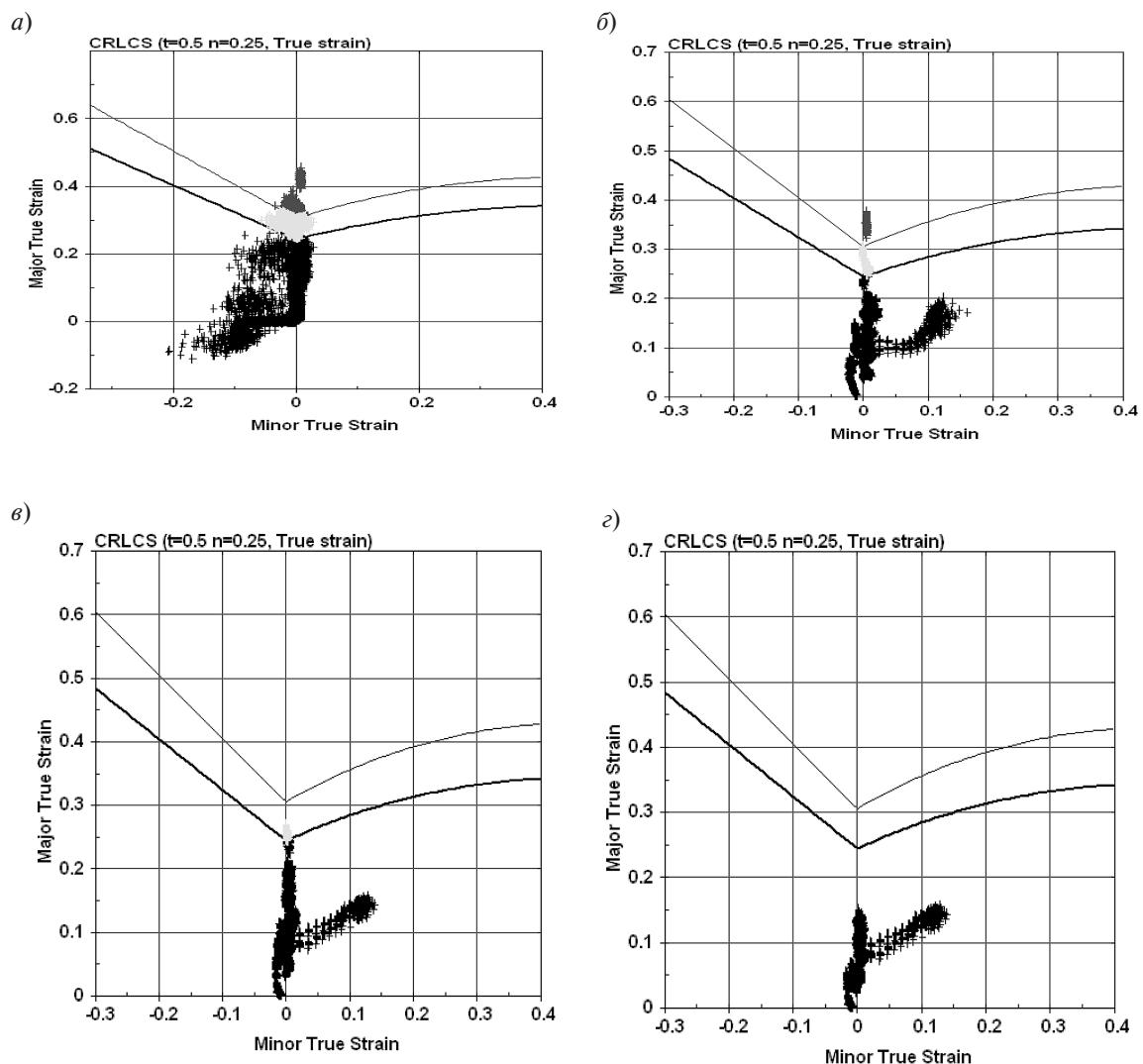
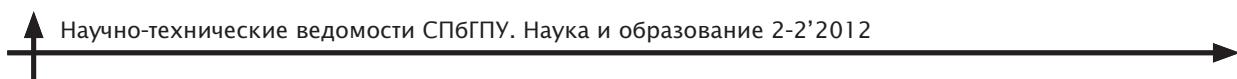


Рис. 3. Диаграммы Келера — Гудвина: вариант импульсного нагружения,  $T_0 = 80$  мкс (а); вариант импульсного нагружения,  $T_0 = 320$  мкс (б); вариант статико-импульсного нагружения,  $T_0 = 320$  мкс (в); вариант статико-импульсного нагружения,  $T_0 = 80$  мкс (г)



формирования достигается за счет более равномерного деформирования точек заготовки по сравнению с вариантом импульсного деформирования. Визуально на диаграммах (см. рис. 3) это проявляется меньшим «размытием» области точек. Более высокая равномерность деформаций будет способствовать повышенным эксплуатационным характеристикам отштампованной детали «мембрана».

Также видно, что более «короткое» давление ( $T_0 = 80$  мкс) при комбинированном со статическим нагружением дает лучшие результаты по сравнению с вариантом более «длинного» давления ( $T_0 = 320$  мкс). Это позволяет говорить о существовании некоторой оптимальной комбинации статического и импульсного нагружения. Очевидно, что такая оптимальная комбинация

будет зависеть от всех основных параметров процесса деформирования и должна определяться соответствующими компьютерными расчетами.

Таким образом, с применением конечно-элементного программного комплекса LS-DYNA970 разработана методика расчета статико-импульсной вытяжки-формовки ортотропных тонколистовых металлов подвижной средой. Установлено, что применение комбинированного статико-импульсного нагружения для штамповки детали «мембрана» из алюминиевого сплава АМг3-М толщиной 0,5 мм позволит снизить максимальные деформации в разных точках заготовки ниже уровня предельных деформаций, определяемых диаграммой Келера — Гудвина.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Здор, Г.Н. Разработка эффективных технологических устройств для магнитно-эластоимпульсной вырубки — пробивки тонколистовых материалов [Текст] / Г.Н. Здор, А.В. Мамутов, В.С. Мамутов, Д.В. Смотраков // Металлообработка. — 2001. № 2. — С. 28–32.
2. Мамутов, А.В. Измерение давления в процессах электроимпульсной штамповки [Текст] / А.В. Мамутов, В.С. Мамутов // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металургии и машиностроении. Сб. научн. тр.— Краматорск: Изд-во Донбасской государственной машиностроительной академии, 2005.— С. 33–39.
3. Mamutov, A.V. Finite Element Simulation of Sheet Metal Forming Using LS-DYNA Code [Текст] / A.V. Mamutov, V.S. Mamutov // In International workshop on New Approaches to High-Tech: Nondestructive Testing and Computer Simulation in Science and Engineering.— Proc. of SPAS. — St. Petersburg, 2005.— Vol. 9.— P. 72–74.

УДК 621.3.032.434

*В.В. Толмачёв, И.А. Богоев, С.М. Вожмянин*

## МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВОЧНОГО РАСЧЕТА ВИХРЕВОГО ЗАПАЛЬНО-СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО МОДУЛЯ ТУРБОУСТАНОВОК

Известны различные системы розжига, основанные на предварительной закрутке горючей газовоздушной смеси в специально предназначенном для этого устройстве. Эти системы розжига достигли наивысшего своего развития с разработкой и реализацией вихревых запально-горелочных устройств (ВЗГУ) и нашли широкое применение для розжига в камерах сгорания и топках котлов турбоустановок, стабилизации факела на предельных режимах работы, а также

для осуществления технологических процессов, связанных со сборкой, монтажом и демонтажом турбоустановок и др. [1–3].

В связи с многообразием сфер применения ВЗГУ признано целесообразным осуществить комплекс теоретических и экспериментальных исследований на натурных моделях вихревого запально-стабилизирующего модуля (ВЗСМ). Сложная взаимосвязь протекающих процессов в вихревых системах, отсутствие до недавнего



времени достоверных экспериментальных данных об их аэродинамических, тепловых и рабочих характеристиках, а также отсутствие проектировочного расчета ВЗСМ обусловили необходимость проведения большого объема экспериментальных исследований в натурных и стендовых условиях, результаты которых отражены в публикациях [1–8]. Экспериментальные данные получены контактными методами на физических моделях ВЗСМ с помощью воздушных продувок специальными пневмометрическими зондами и термопарами в условиях горения, а также методом численного моделирования в стандартном газодинамическом пакете «Fluent».

Предлагаемый алгоритм методики инженерно-проектировочного расчета ВЗСМ, представленный в виде блок-схемы на рис.1, позволяет проектировать конструкцию модуля и оперативно осуществлять ее оптимизацию для требуемой длины свободного факела, сокращает время и материальные издержки на разработку новых и модернизацию действующих конструкций ВЗГУ для заданных условий эксплуатации.

В основу методики расчета положены результаты обобщения экспериментальных данных, которые получены на натурных моделях ВЗСМ. Методика учитывает влияние геометрических параметров закручивающего устройства тангенциального типа, коэффициента избытка воздуха, шероховатости внутренней стенки вихревой трубы и ее длины на аэродинамические, тепловые и рабочие характеристики проектируемой конструкции.

Расчет проводится последовательными приближениями без учета теплообмена с окружающей средой в одномерной постановке задачи; свойства рабочих тел считаются подчиняющимися закономерностям совершенного газа; течение — стационарное, среда — вязкий газ. Для мобильности использования данной методики расчет преобразован к программному виду, который реализован на персональном компьютере (ПК).

Методика позволяет проектировать конструкции ВЗСМ в следующих границах изменения его геометрических параметров: конструктивного параметра закрутки закручивающего устройства тангенциального типа  $\Phi_{\text{вхк}}^* = 4,2 - 14,2$ ; относительного конфузорного сужения

выходного сечения камеры закручивающего устройства  $\bar{F}_{\text{кон}} = 0,44 - 1,0$ ; относительной длины трубы  $L_{\text{тр}}/d_{\text{тр}} = 10 - 50$  с диаметром  $d_{\text{тр}} = 0,02 - 0,08$  м и относительной шероховатости ее внутренней стенки  $2\Delta/d_{\text{тр}} = 0,1 - 0,8\%$ . Рабочая длина трубы ВЗСМ при средней относительной шероховатости составляет около  $L_{\text{тр lim}} = 3,5$  м, а максимальная тепловая мощность  $N_{\text{взсм}} = 150$  кВт. Методика проектирования конструкции ВЗСМ (см. рис.1) включает следующие основные этапы расчетов: тепловой, конструктивный и заключительный (расчет средней температуры и длины свободного факела на режимах горения).

В качестве исходных данных в методике принимаются: требуемая тепловая мощность ВЗСМ и длина вихревой трубы, состав горючего газа, схема подводов компонентов горения, давление и температура воздуха и газа на входе, а также величина противодавления внешней среды в области устья вихревой трубы, соответствующая условиям эксплуатации вихревого модуля.

Тепловой расчет проводится для номинального режима горения при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1$ . Расчет проводится методом последовательных приближений. При этом определяются свойства и термодинамические параметры рабочих тел, а также требуемый расход газа и соответственно воздуха, по которым определяются основные геометрические параметры закручивающего устройства и конструкции в целом.

В ходе конструктивного расчета ВЗСМ методом последовательных приближений определяются геометрические параметры закручивающего устройства, диаметр и максимальная длина вихревой трубы  $L_{\text{тр lim}}$  для заданной шероховатости ее внутренней стенки  $2\Delta/d_{\text{тр}}$  и расчетных параметров закручивающего устройства.

После конструктивного расчета ВЗСМ проводится расчет средней температуры и длины свободного факела на различных режимах горения при изменении коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  в интервале 0,7–1,5.

Тепловые характеристики ВЗСМ на основных режимах горения и полученная экспериментальным путем аналитическая зависимость длины факела от коэффициента избытка воздуха и интенсивности закрутки потока на выходе из вихревой трубы позволяют осуществлять опти-

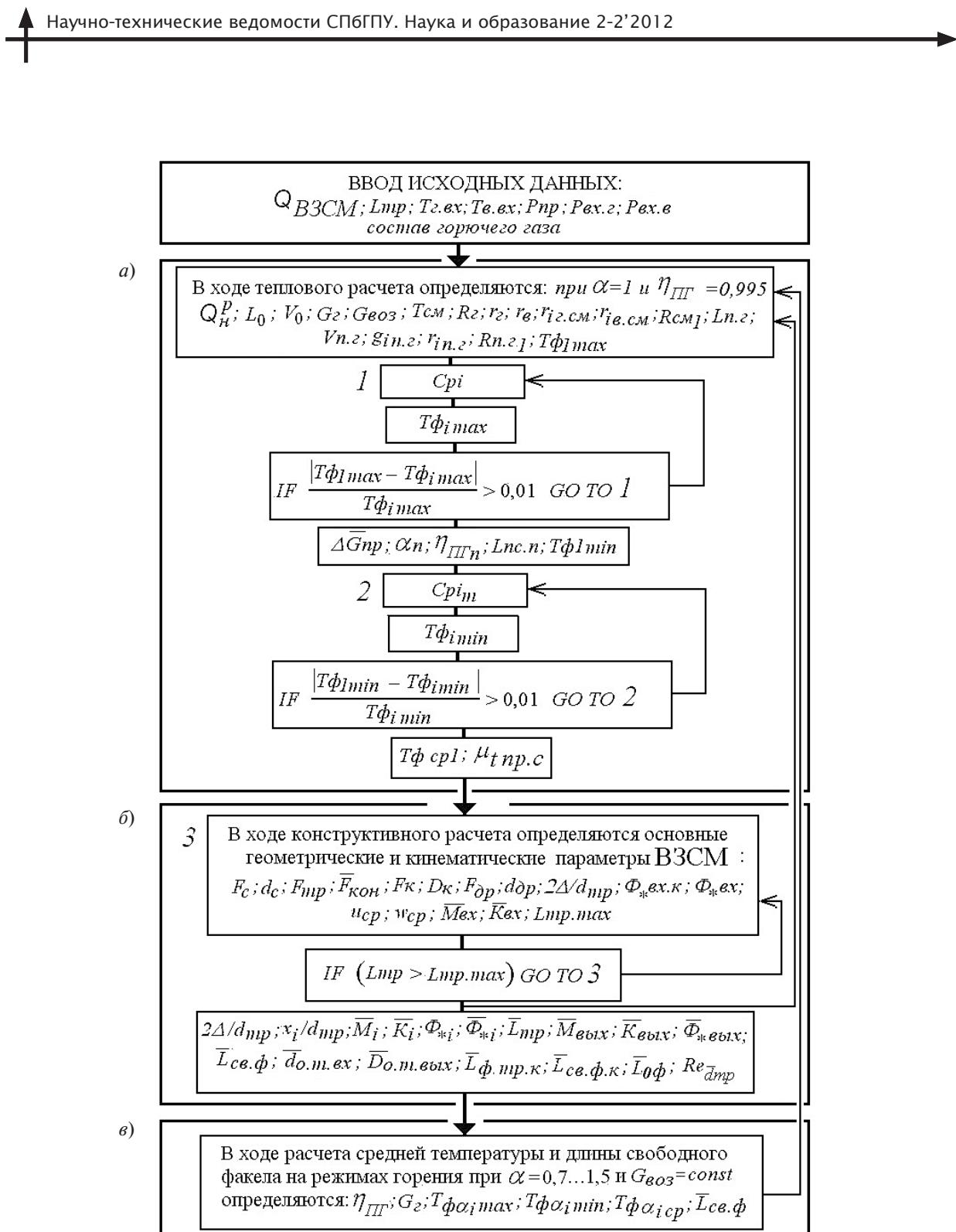


Рис. 1. Блок-схема реализации на персональном компьютере методики инженерно-проектировочного расчета конструкции вихревого запально-стабилизирующего модуля (В3СМ):  
 а — тепловой расчет; б — конструктивный расчет; в — расчет средней температуры и длины свободного факела на различных режимах горения



**Основные геометрические параметры конструкции ВЗГУ, предназначенной для разных условий эксплуатации и спроектированной на эти условия конструкции ВЗСМ**

Тип ВЗГУ	Внутренний диаметр тангенциального канала закручивающего устройства $d_c$ , м	Внутренний диаметр камеры закручивающего устройства $D_k$ , м	Внутренний диаметр вихревой трубы $d_{tp}$ , м	Рекомендуемая длина вихревой трубы [7] $L_{tp}$ , м	Расчетная максимальная длина вихревой трубы ВЗСМ $L_{tp\,pac}$ , м
ВЗГУ-01	0,0092 (Ц)	0,037	0,0245	0,2–0,5	0,55
ВЗГУ-1В*	0,0124 (Ц)	0,0355	0,032	0,8–1,0	1,2
ВЗГУ-1Н*	0,0140 (Ц)	0,046	0,046	до 1,0	—
ВЗГУ-2В*	0,0160 (Ц)	0,050	0,050	1,2–2,0	1,89
ВЗГУ-3В*	0,0180 (Э)	0,06	0,05	2,0–3,0	2,9
ВЗГУ-4В*	0,0200 (Э)	0,078	0,06	3,0–4,0	4,3
ВЗГУ-6	0,0340 (Э)	0,108	0,079	до 4,0	4,1

П р и м е ч а н и е. \* — принятые обозначения конструкции ВЗГУ: В — высоконапорные с рабочим избыточным давлением перед тангенциальным каналом камеры закручивающего устройства 1,96–5,9 кПа (200–600 мм вод. ст.); Н — низконапорные с рабочим избыточным давлением перед тангенциальным каналом камеры закручивающего устройства 0,491–1,47 кПа (50–150 мм вод. ст.).

мальную компоновку вихревого модуля с горелочными устройствами камеры сгорания и топок котлов турбоустановок. Положенные в основу методики проектировочного расчета конструкции ВЗСМ экспериментальные характеристики устойчивости факела и рабочего регулирования по расходу газа создают возможность в эксплуатационных условиях осуществлять выбор оптимального режима горения.

Для определения достоверности методики проектировочного расчета ВЗСМ проводились тестовые расчеты их конструкции, которые проектировались в расчете на натурные условия эксплуатации внедренных ВЗГУ, показавших высокую эксплуатационную надежность в турбоустановках.

На рис. 2 представлены конструкции вихревых запально-горелочных устройств, которые

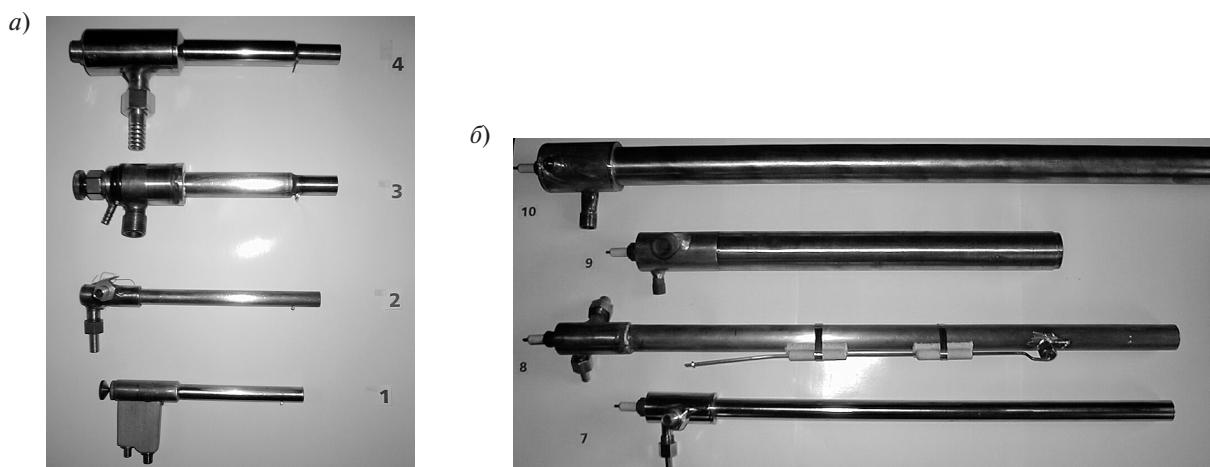
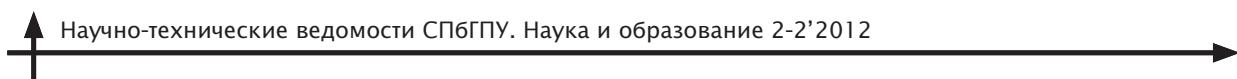


Рис. 2. Конструкции вихревых запально-горелочных устройств (ВЗГУ):  
а — для камер сгорания газотурбинных установок; б — для топок котлов паротурбинных установок



внедрены в камерах сгорания газотурбинных установок, таких, как ГТ-100, ГТЭ-65 и ГТЭ-150 «ЛМЗ», а также в котлах типа ТГМ и ПТВМ, широко используемых на ТЭЦ. В основе принципа работы ВЗГУ лежит теоретически обоснованный и экспериментально подтвержденный вихревой способ передачи пламени (ВСПП), использование которого позволяет улучшить рабочие характеристики запальных и дежурных горелочных устройств камер сгорания и котлов турбоустановок. При этом данный метод дает возможность существенно упростить конструкцию запально-стабилизирующих устройств, повысить температуру факела, расширить пределы рабочего регулирования и устойчивость свободного факела как к отрыву и проскоку пламени, так и к внешним потокам различной пространственной ориентации.

Достоверность предложенной методики проектировочного расчета конструкции ВЗСМ и ее характеристики определяется сравнением главных геометрических параметров опытно-

промышленных конструкций ВЗГУ и спроектированных ВЗСМ. Результаты расчетов геометрических параметров ВЗСМ и внедренных ВЗГУ представлены в табл.1.

Анализ этих результатов показывает вполне удовлетворительное согласование рекомендуемых длин вихревой трубы конструкции ВЗГУ в работе [7] с длинами труб спроектированных ВЗСМ — разница не превышает 2–6 калибров.

Предлагаемый алгоритм инженерно-проектировочного расчета ВЗСМ позволяет при его реализации на персональном компьютере осуществлять оптимизацию конструкции вихревого модуля с требуемой длиной свободного факела для заданных условий эксплуатации.

Достоверность методики подтверждена удовлетворительном совпадением расчетных геометрических и режимных параметров проектируемой конструкции ВЗСМ с параметрами действующих опытных и промышленных образцов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бодров, И.С.** Экспериментальные исследования влияния системных факторов на надежность воспламенения факела электроискровых запальных устройств энергетических турбоустановок [Текст] / И.С. Бодров, В.В. Толмачев, К.А. Щенников // Энергетические машины и установки.— 2008. № 4.— С. 15–22.
2. **Щенников, К.А.** Вихревая горелка для технологического нагрева (ВГН) крепежных элементов и ступиц муфт при ремонте и модернизации энергетического оборудования [Текст] / К.А. Щенников, В.В. Толмачев, В.К. Глушанов // Современное энергомашиностроение: Респ. межвед. науч.-техн. сб.— СПб.: Изд-во «Инструмент», 1997.— С. 47–54.
3. **Смирнов, А.А.** Способы стабилизации процесса горения предварительно подготовленной обедненной топливовоздушной смеси в КС ГТУ [Текст] / А.А. Смирнов, В.В. Толмачев // Современное турбостроение: Сб. научн. тр.— Вып. 3 / Под общ. ред. И.А. Богова / МАН ВШ Санкт-Петербургское отн-ние. Санкт-Петербургский институт машиностроения.— СПб., 2000.— С. 86–90.
4. **Толмачёв, В.В.** Кинематика потока в газовых запальных устройствах вихревого типа с тангенциальным генератором закрутки [Текст] / В.В. Толмачев, И.С. Бодров // Современное турбостроение: Матер. междунар. научно-практ. конф. / МАН ВШ Санкт-Петербургское отн-ние. Санкт-Петербургский институт машиностроения.— СПб., 2012. Т. 1. № 2.— С. 89–94.
5. **Толмачёв, В.В.** Влияние сужения выходного сечения тангенциального генератора закрутки на кинематику потока в запальных устройствах вихревого типа [Текст] / В.В. Толмачёв, А.А. Смирнов, И.С. Бодров // Современное турбостроение: Матер. междунар. научно-практ. конф. / МАН ВШ Санкт-Петербургское отн-ние. Санкт-Петербургский институт машиностроения.— СПб., 2004.— С. 74–76.
6. **Щенников, К.А.** Электроискровые запально-горелочные устройства [Текст] / К.А. Щенников, И.А. Богов, В.В. Толмачев // Современное турбостроение: Сб. научн. тр.— Вып. 3 / Под общ. ред. И.А. Богова / МАН ВШ Санкт-Петербургское отн-ние. Санкт-Петербургский институт машиностроения.— СПб., 2000.— С. 81–94.
7. **Щенников, К.А.** Новые запальные системы вихревого типа для газотурбинных установок и других энергетических объектов [Текст] / К.А. Щенников, В.Г. Тырышкин, И.С. Бодров // Теплоэнергетика.— 1986. № 5.— С. 55–56.
8. **Толмачёв, В.В.** Экспериментальные исследования вихревого запально-стабилизирующего горелочного модуля для турбоустановок [Текст] / В.В. Толмачёв, И.А. Богов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2012. Т. 1. № 2.— С. 89–94.



УДК 519.1: 655.1

А.В. Иванов, В.В. Ваганов, К.А. Котов

## УПОРЯДОЧИВАНИЕ ЗАКАЗОВ ПО МНОЖЕСТВУ КРИТЕРИЕВ ПРЕДПОЧТЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ НЕЙРОСЕТЕВОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СОРТИРОВКИ

Критерием оптимальности, наиболее полно отражающим требование наилучшего использования производственных ресурсов (при обеспечении минимальных сроков выпуска изделий), является минимум длительности совокупного производственного цикла изготовления портфеля заказов [1–3]. Чем меньше значение этого показателя, тем плотнее составлено расписание, а значит, лучше используются производственные мощности предприятия, его материальные и трудовые ресурсы. В свою очередь, длительность совокупного производственного цикла в значительной мере зависит от очередности обработки заказов на отдельных операциях производственного процесса. Условие обеспечения минимальной длительности производственного цикла отдельных заказов приводит к необходимости решения так называемой «задачи упорядочения» с сохранением постоянной очередности обработки заказов на всех операциях производственного процесса. В этом случае процесс оптимизации заключается в выборе такого порядка запуска изделий в производство, который обеспечил бы минимально возможную длительность совокупного производственного цикла и минимум простоев оборудования.

### Представление упорядочивания заказов в потоке нейросетевым решением комбинаторной задачи сортировки

Общая последовательность предлагаемого процедуры упорядочивания перед решением задачи распределения заказов по производственным линиям представлена четырьмя этапами:

1. Динамически определяется множество  $V$  соответствий (критерии значимости) между характеристиками значимости исполнения в производстве и полученным заказом, а также обозначается исходное, подлежащее ранжированию множество  $D$  полученных заказов.

2. Строится таблица соответствия множества  $D$  заказов множеству критериев значимости. Та-

блица определяет исходные данные для решения задачи ранжирования в рамках комбинаторной задачи о назначениях.

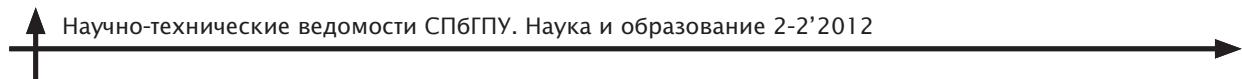
3. Формируется нейросетевая модель решения задачи ранжирования на основе динамической нейронной сети Хопфилда.

4. Инициализируя нейронную сеть случайными входными векторами, получаем искомую последовательность индексов заказов в соответствии с заданным множеством критериев значимости исполнения заказов.

*Первый этап метода* — определение множества  $V$  смысловых соответствий и формирование исходного множества ранжируемых заказов — тривиален и в основном зависит от особенностей тех или иных производств.

*На втором этапе* реализации метода ранжирования необходимо так распределить заказы по группам критериев, чтобы каждый заказ оценивался преимущественно одной группой критериев, а каждая группа критериев оценивала преимущественно один заказ и суммарная значимость заказа (группы заказов) по всем комбинаторным группам критериев значимости была максимальной.

Процедура с использованием нейросетевой модели позволяет ранжировать заказы как в случае множества  $V$  (критерии значимости), так и в предельном случае —  $V = 1$ . Пусть имеется множество чисел — значений предпочтения заказов в потоке:  $\{r_i\}$ ,  $i \in N = 1, \dots, n$ . Необходимо расставить заказы в порядке возрастания, т. е. найти такую перестановку индексов  $j = \pi(i)$ , что  $\forall j \in 1, \dots, (n-1) r_j \leq r_{j+1}$ . Построим решение данной задачи на основе использования синтезированной нейроноподобной модели для решения задач комбинаторной оптимизации. С этой целью сведем сформулированную задачу сортировки чисел к некоторой оптимизационной задаче. Для этого докажем следующее утверждение. Пусть имеется произвольное множество чисел  $\{r_i\}$ ,  $i \in N = 1, \dots, n$  и монотонно возрастающий



ряд положительных чисел  $\{a_j\}, j \in N = 1, \dots, n$ , таких, что  $\forall j \in 1, \dots, (n-1) a_j < a_{j+1}$ . На множестве всевозможных подстановок  $\{\pi(i)\} = \Pi, j = \pi(i)$ , зададим линейный функционал вида

$$J[\pi(i)] = \sum_{j=1}^n a_j r_j. \quad (1)$$

Обозначим  $j^* = \pi^*(i)$  перестановку, сортирующую в порядке возрастания заданное произвольное множество чисел  $\{r_i\}$ , то есть удовлетворяющую условию  $\forall j^* \in 1, \dots, (n-1) r_j^* < r_{j+1}^*$ . Тогда справедливо следующее:

$$\begin{aligned} \pi^*(i) &= \arg \max_{\pi(i) \in \Pi} \{J[\pi(i)]\} = \\ &= \arg \max_{j=\pi(i) \in \Pi} \left\{ \sum_{j=1}^n a_j r_j \right\}. \end{aligned} \quad (2)$$

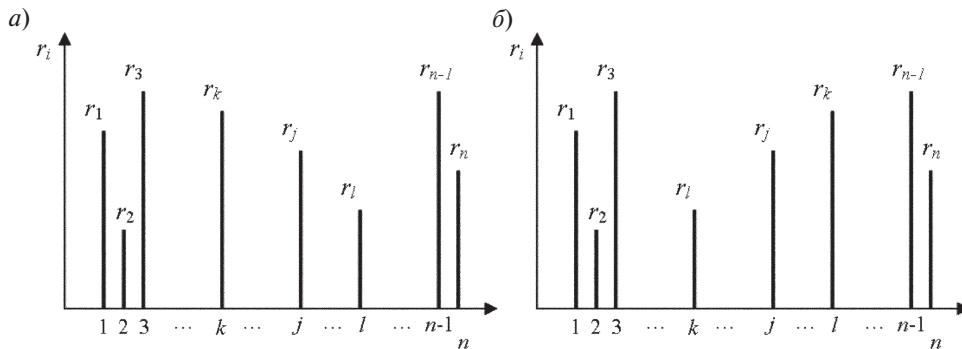
Для доказательства данного утверждения возьмем произвольную подстановку  $\pi(i)$ , порождающую следующую перестановку исходного множества чисел (рис. 1a):

$$(r_1, r_2, \dots, r_k, \dots, r_j, \dots, r_l, \dots, r_n).$$

Для определенности положим, что  $k < l$  и  $r_k \geq r_l$ , т. е. данная пара чисел в этой перестановке является неотсортированной в смысле сформулированной выше задачи. Возьмем вторую подстановку  $\pi^*(i)$ , полученную из первой транспозицией  $k$ -го и  $l$ -го элементов. Данной подстановке будет соответствовать перестановка исходного множества чисел (рисунок б)

$$(r_1, r_2, \dots, r_l, \dots, r_j, \dots, r_k, \dots, r_n),$$

которая отличается от первой тем, что на  $k$ -м месте находится число  $r_l$ , а на  $l$ -м — соответственно  $r_k$ .



Перестановки исходного множества чисел

В такой перестановке данная пара чисел отсортирована в смысле рассматриваемой задачи.

Определим значения функционала (1) на подстановках  $\pi(i)$  и  $\pi^*(i)$ :

$$J[\pi(i)] = \sum_{j \in N \setminus \{k, l\}} a_j r_j + a_k r_k + a_l r_l; \quad (3)$$

$$J[\pi^*(i)] = \sum_{j \in N \setminus \{k, l\}} a_j r_j + a_k r_l + a_l r_k. \quad (4)$$

И найдем их разность:

$$\begin{aligned} \Delta_{kl} &= J[\pi^*(i)] - J[\pi(i)] = \\ &= a_k r_l - a_l r_k - (a_k r_k + a_l r_l) = (a_k - a_l)(r_l + r_k). \end{aligned}$$

В силу принятого предположения  $k < l$  и  $r_k \geq r_l$ , следовательно, во-первых:  $r_l - r_k \leq 0$ , во-вторых:  $a_k - a_l < 0$ , так как ряд чисел  $\{a_j\}$  является монотонно возрастающим по определению. Откуда следует

$$\Delta_{kl} = J[\pi^*(i)] - J[\pi(i)] \geq 0, \quad (5)$$

то есть значение введенного линейного функционала (1) на перестановке, в которой некоторая пара чисел отсортирована, больше или равно значению данного функционала на перестановке, отличающейся только тем, что выбранная пара чисел не отсортирована.

На третьем и четвертом этапах реализации метода формируется и используется нейросетевая модель решения задачи ранжирования на основе динамической нейронной сети Хопфилда.

#### Нейросетевая модель упорядочивания заказов на основе динамической сети Хопфилда

Ранжирование заказов в случае единственного критерия предпочтения, т. е. в предельном случае —  $V = 1$ , реализуется при следующем пред-



положении: имеется множество значений значимости списка заказов в потоке, найденных в результате функционирования производственных линий:  $\{r_i\}$ ,  $i \in N = 1, \dots, n$ . В результате ранжирования числа-предпочтения расставляются в порядке возрастания индексов  $j = \pi(i)$  так, что  $\forall j \in 1, \dots, (n-1)$   $r_j \leq r_{j+1}$ . Пара чисел  $\{r_k, r_l\}$  была выбрана произвольно. Аналогичные рассуждения можно провести и относительно любой другой пары чисел. В частности, условие (5) будет справедливо для всевозможных пар соседних элементов. В силу того, что любая перестановка может быть представлена суперпозицией транспозиций соседних элементов, максимальное значение линейного функционала (1) будет достигаться на перестановке, в которой все пары соседних элементов отсортированы, что и соответствует решению сформулированной выше задачи сортировки. Таким образом, исходная задача поиска сортирующей перестановки сведена к оптимизации линейного функционала на множестве всевозможных перестановок, решение которой определяется в виде (2).

Для решения такой задачи с помощью нейроноподобной сети приведем ее нейросетевую интерпретацию. Представим произвольную подстановку  $j = \pi(i)$  в виде матрицы нейронов  $[V_{ij}]$  размерностью  $n \times n$  следующим образом:

$$(j = \pi(i)) \Leftrightarrow (V_{ij} = 1) \forall i, j \in \overline{1, n}.$$

На содержательном уровне возбужденное состояние нейрона  $V_{ij} = 1$  соответствует тому факту, что  $i$ -й элемент исходного множества значений значимостью  $r$  занимает  $j$ -е место в подстановке  $\pi(i)$ . В любой строке и любом столбце такой матрицы должен быть ровно один возбужденный нейрон; следовательно, справедливы ограничения вида

$$\sum_{i=1}^n V_{ij} = 1 \quad \forall j \in \overline{1, n}; \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n V_{ij} = 1 \quad \forall i \in \overline{1, n}. \quad (7)$$

Нейросетевая интерпретация оптимизируемого функционала (1) будет представлена следующим образом:

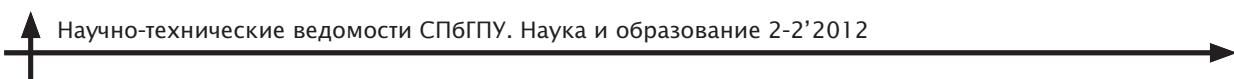
$$\phi(V) = \sum_{j=1}^n a_j \sum_{i=1}^n r_j V_{ij} \rightarrow \max_M. \quad (8)$$

Рассмотрим задачу распределения множества заказов по производственным мощностям путем нейросетевого решения задачи о назначениях. Существует множество многофункциональных производственных линий и множество заказов в текущем потоке их поступления. Опытным путем или экспертно определены эффективности каждой производственной линии на каждой партии (заказе). Необходимо так распределить производственные линии по заказам, чтобы каждое средство использовалось преимущественно для одного заказа, а каждый заказ полностью выполнялся преимущественно одной линией и при этом суммарная эффективность назначенных и распределенных на заказы линий полиграфического производства была максимальной.

Дано: пусть  $j = 1, 2, \dots, M$  — номера линий  $d_j$ , где  $M$  — общее количество линий производственной системы;  $i = 1, \dots, N$  — номера заказов  $v_i$ , где  $N$  — общее количество заказов производственной системы. Обозначим через  $R = \|r_{ji}\| N \times M$ -матрицу производительностей, элементы которой  $r_{ji}$  представляют собой эффективность линии с номером  $j$  относительно заказа (группы заказов) с номером  $i$ . Обозначим через  $X = \|x_{ji}\| N \times M$ -матрицу неизвестных, элемент которой  $x_{ji}$  принимает значение 1, если линия с номером  $j$  будет выполнять заказ с номером  $i$ , и значение 0 в противном случае. Ограничения математической модели представлены системой уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^M x_{ji} \leq 1, & i = \overline{1, N}; \\ \sum_{i=1}^N x_{ji} \leq 1, & j = \overline{1, M}; \\ x_{ji} \in \{0, 1\}, & j = \overline{1, M}, i = \overline{1, N}. \end{cases} \quad (9)$$

Здесь первое уравнение означает, что каждому заказу (группе заказов) будет назначено не более чем одно доминирующее средство производства (наиболее эффективная линия). В соответствии со вторым уравнением каждая линия будет назначена не более чем на один заказ (группу заказов). Условия третьего уравнения являются естественными ограничениями на введенные переменные [5, 6].



Требуется: определить матрицу назначений  $X$ , при которой имеет место критерий оптимальности

$$F(X) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N r_{ji} x_{ji} \rightarrow \max. \quad (10)$$

Задача (9), (10) называется задачей о назначениях с аддитивным критерием оптимальности. При рассмотрении задачи о назначениях в стандартной форме предполагается, что количество заказов (различных групп заказов в потоке) равно количеству назначенных линий:  $M = N$ . Нетрудно показать, что введением фиктивных заказов или фиктивных линий математическая модель в открытой форме (9) приводится к эквивалентной модели

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^M x_{ji} = 1, \quad i = \overline{1, N}; \\ \sum_{i=1}^N x_{ji} = 1, \quad j = \overline{1, M}; \\ 0 \leq x_{ji} \leq 1, \quad j = \overline{1, M}, \quad i = \overline{1, N}; \\ N = M. \end{cases} \quad (11)$$

Сравнив выражения (6)–(8) с результатами нейросетевой интерпретации задачи о назначениях в виде (9)–(11), приходим к выводу о том, что оптимизационная постановка задачи сортировки тождественна постановке задачи о назначениях при условии, что элементы матрицы производительностей последней определяются как

$$c_{ij} = a_j r_i, \quad \text{где } i, j \in \overline{1, n}. \quad (12)$$

Следовательно, дальнейшее построение нейросети для решения задачи (2) будет полностью совпадать с построением сети для решения задачи о назначениях. При этом параметры сетей для решения как первой, так и второй задачи будут определяться одними и теми же выражениями. В частности, воспользовавшись параметрами сети для решения задачи о назначениях в виде

$$T_{ji\mu\nu} = -A\delta_{j\mu} - \delta_{i\nu}; \\ I_{ji} = -(A + B) - Fr_{ji}, \quad i, j, \mu, \nu \in \overline{1, n},$$

с учетом условия (12) получим параметры сети для решения задачи сортировки в следующем виде:

$$T_{ji\mu\nu} = -A\delta_{j\mu} - B\delta_{i\nu}, \\ I_{ij} = -(A + B) - Fa_j r_i, \quad i, j, \mu, \nu \in \overline{1, n}. \quad (13)$$

Используя другие выражения для определения параметров сети, решающей задачу о назначениях, можно получить семейство нейросетей для решения задачи сортировки потока заказов на входе производственной системы

Таким образом, разработан подход к синтезу нейросетевой модели ранжировки заказов в потоке на входе в производственную систему полиграфического предприятия, позволяющий с высокой оперативностью в условиях постоянной смены производственных планов решать задачу сортировки заказов по степени их значимости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Миронова, Г.В.** Организация полиграфического производства [Текст] / Г.В. Миронова [и др.].— М.: Изд-во МГУП, 2002.— 352 с.
2. **Раскин, А.Н.** Технология печатных процессов [Текст] / А.Н. Раскин [и др.].— М.: Книга, 1989.— 367 с.
3. **Волкова, Л.А.** Издательско-полиграфическая техника и технология [Текст] / Л.А. Волкова.— М.: Изд-во МГУП, 1999.— 143 с.
4. **Акулич, И.Л.** Математическое программирова-  
ние в примерах и задачах [Текст] / И.Л. Акулич.— М.: Высшая школа, 1986.— 319 с.
5. **Назаров, А.В.** Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем [Текст] / А.В. Назаров, А.И. Лоскутов.— СПб.: Наука и техника, 2003.— 384 с.
5. **Page, E.W.** Algorithm development for neural networks [Текст] / E.W. Page, G.A. Tagliarini // SPIE.— 1988.— Vol. 880.— P. 11–19.



УДК 621.548.01:621.311.24.01

В.В. Елистратов, А.А. Минина

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНОЙ ЧАСТИ ВЕТРОВОГО ПОТОКА ЗА КРАТКОСРОЧНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ ВРЕМЕНИ

В соответствии с Распоряжением Правительства РФ №1-р от 9 января 2009 года доля использования возобновляемых источников энергии (кроме «большой гидроэнергетики») в энергобалансе страны к 2020 году должна составить 4,5 %. Для обеспечения этого показателя необходимо построить ветроэлектрические станции (ВЭС) мощностью 7 млн кВт с выработкой 18,9 млрд кВт·ч. Учитывая непостоянный характер прихода ветровой энергии во времени, для эффективного функционирования ВЭС необходимо иметь достоверную информацию по прогнозу выработки в долгосрочных, среднесрочных и краткосрочных интервалах времени. Постановлением Правительства РФ № 529 «О совершенствовании порядка функционирования оптового рынка электрической энергии (мощности)» был установлен почасовой учет на оптовом рынке электроэнергии, что вносит сложности в использование ресурсов ветровой энергии в краткосрочных интервалах, под которыми будем понимать от 0,5 до 2 часов.

В настоящее время для целей моделирования ветрового потока в таких интервалах используются данные об осредненных значениях скорости ветра из климатических справочников, что не является правильным и достоверным решением. В первой части предлагаемой статьи приводится доказательство этого факта. Во второй части рассматриваются способы построения для конкретного региона вероятностной модели ветрового потока, которая может быть использована для прогнозирования энергетически эффективной части ветрового потока с допустимой погрешностью. Под энергетически эффективной частью ветрового потока понимается интервал скорости от начальной  $v_{\text{eff min}}$ , при которой ветроэнергетическая установка (ВЭУ) начинает производство и отдачу энергии в сеть, до скорости отключения  $v_{\text{eff max}}$ , т. е. скорости ветра, при которой агрегат должен быть выведен из работы по условиям прочности конструкции.

Такие зависимости, как формула Вейбулла — Гудрича, описывающие ход скоростей ветра и использующие годовые осредненные скорости ветра, не учитывают внутрирядовые связи, под которыми понимается функциональная связь между текущим и предшествующим ему значениями распределения скоростей. Для доказательства необходимости учета внутрирядовых связей исследованы данные натурных измерений скорости ветра с интервалом 10 минут в течение 1 года на метеомачте о. Русский, которая была установлена для обоснования параметров Дальневосточной ВЭС. Проанализированы годовой ход скорости ветра и изменчивость этой скорости за период измерения.

На основании имеющихся экспериментальных данных были сформированы показатели частоты приращений скоростей ветра относительно их абсолютных значений (линия 1 на рис.1 ).

Для допущения возможности использования годовых осредненных показателей необходимо учитывать независимость событий появления каждой скорости ветра, благодаря которой вероятность перехода из состояния  $v_1$  в состояние  $v_2$  (что эквивалентно приращению скорости ветра на величину  $v_2 - v_1$ ) равна произведению вероятностей наступления данных событий. В силу очевидного факта, что данные события являются несовместными, частота приращения относительно его абсолютного значения равна сумме частот данного приращения из всех возможных начальных состояний  $v_1$ . График полученных частот приращений отображен линией 2 на рис.1.

Визуальное отличие представленных графиков подтверждается существенным отличием центральных моментов и коэффициента эксцесса [1]. Последний для зависимости 1 равен 12,57, а для 2 — всего 3,93.

Столь существенное различие полученных зависимостей говорит о том, что допущение об отсутствии внутрирядовой связи — неверно

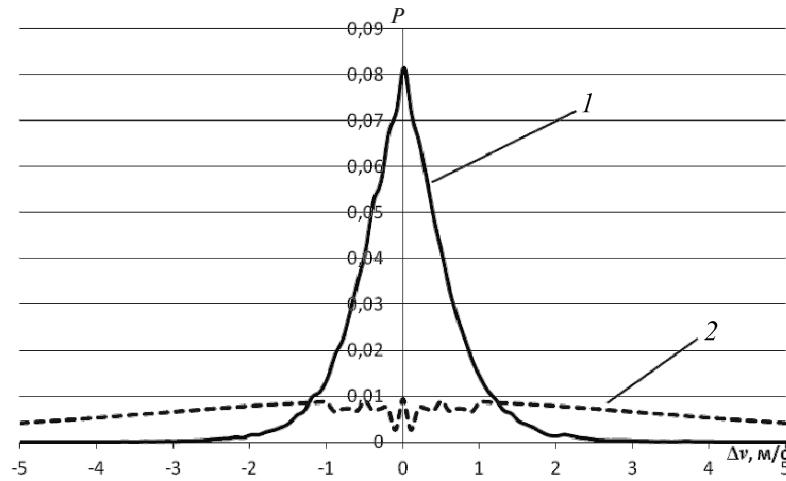


Рис. 1. Графики функций распределения приращения скорости ветра с учетом (1) и без учета (2) внутрирядовой связи

и у показателей ветрового потока имеется внутрирядовая связь, которая предопределяет необходимость рассматривать распределение скорости ветра не как случайную величину, а как величину, удовлетворяющую вероятностным законам с внутрирядовой зависимостью (зависимостью от предыдущего значения скорости ветрового потока, далее — начальной скорости).

Для дальнейшего изучения все существующие данные измерений разделяются на подмножества по значению начальной скорости и исследуются на соответствие различным вероятностным законам распределения. Однако в связи с тем, что некоторые подмножества содержат количество измерений, недостаточное для состоятельной оценки, необходимо провести анализ возможности объединения данных выборок [3]. Учитывая, что для распределений приращения скорости важен в первую очередь характер распределения основной массы значений, предложен следующий показатель, характеризующий выборку для оценки однородности с другой выборкой:

$$k_1 = |\mu_{11} + \mu_{12}| + |\sigma_1 - \sigma_2| + \frac{|\sqrt[3]{\mu_{31}} - \sqrt[3]{\mu_{32}}| + |\sqrt[4]{\mu_{41}} - \sqrt[4]{\mu_{42}}|}{\theta}, \quad (1)$$

где  $\mu_1$ ,  $\mu_3$  и  $\mu_4$  — несмешанные оценки моментов 1-го, 3-го и 4-го порядков сравниваемых распределений;  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение; а  $\theta$  — понижающий коэффициент, введенный для

того, чтобы понизить влияние коэффициентов асимметрии и эксцесса на итоговый показатель.

В ходе исследования выборок, полученных после объединения подмножеств с недостаточным для оценки количеством элементов, было показано, что каждое из полученных после объединения распределений аппроксимируется отличным от других теоретическим распределением. При этом распределения могут отличаться как видом, так и параметрами распределения [4], которые можно определить, используя оценочные критерии проверки гипотез о законе распределения.

Учитывая, что в данном случае используются средние величины, округленные до одного знака после запятой, разумно применить критерий хи-квадрата К. Пирсона, который основан на оценивании взвешенной суммы квадратов разностей по всем разрядам статистического ряда:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{\psi} \frac{(n_i - F_i)^2}{F_i}. \quad (2)$$

Величина  $\chi^2$  при увеличении  $n$  asymptотически стремится к распределению хи-квадрат.

Данный критерий позволяет проверить гипотезу о соответствии многим классическим законам распределения, к которым, в частности, относят нормальное и логнормальное распределения, экспоненциальное распределение и распределение Пуассона, распределение Максвелла и распределение Вейбулла. Стоить отметить,



что последние предлагались некоторыми исследователями для аппроксимации распределения скорости ветра [5]. Функции распределения для вышеперечисленных законов можно найти в любом справочнике по математической статистике. В свою очередь, использование классических распределений позволяет использовать известные формулы оценки параметров распределения по выборочным данным [6].

Так как все функции распределения, кроме нормального закона, имеют область определения  $0 < x < \infty$ , при использовании критерия Пирсона введено смещение области определения, которое учитывает ограниченность функции распределения скорости ветра слева и равно  $v_0 - v_{\text{тр}}$ .

На основании сравнения критических значений оценочного параметра с его фактическими значениями (2) можно сделать вывод о принятии той или иной гипотезы или отвергнуть ее.

Как видно из полученных данных, все выборки аппроксимируются различными законами распределения с различной степенью удовлетворения критическому значению параметра  $\chi^2$ .

Например, для скоростей ветра 16,2–16,3 м/с наиболее удовлетворяет вышеозначенному критерию закон распределения Вейбулла со следующими параметрами:

$$P(\Delta v)_{v_0=16,2-16,3 \text{ м/c}} = 0,906 \left( \frac{v}{16,635} \right)^{15,635} \times \times \exp \left( - \left( \frac{v}{18,365} \right)^{16,635} \right). \quad (3)$$

А для скорости ветра 15,0 м/с более отвечает логнормальный закон распределения

$$P(\Delta v)_{v_0=15,0 \text{ м/c}} = \frac{1}{0,056v\sqrt{2\pi}} \exp \left[ - \frac{(\ln v + 2,701)^2}{0,006} \right]. \quad (4)$$

Для скорости ветра 9,3 м/с лучше всего соответствует нормальный закон распределения с функцией плотности следующего вида [1]:

$$P(\Delta v)_{v_0=9,3 \text{ м/c}} = \frac{1}{0,76\sqrt{2\pi}} \exp \left[ - \frac{(\Delta v + 0,072)^2}{1,155} \right]. \quad (5)$$

График полученной функции распределения при начальной скорости  $v_0 = 9,3$  м/с (5) на энергетически значимом диапазоне ветров представлен на рис. 2. При построении графика было использовано смещение в размере начальной скорости, что связано с тем, что полученная функция (5) отображает закон изменения приращения скорости ветра.

Для визуальной оценки погрешности на графике отмечен доверительный интервал величиной 0,95 (вертикальные линии на рис. 2). Это можно прочитать так: «при текущем значении скорости ветра, равной 9,3 м/с, с вероятностью 95 % можно утверждать о попадании следующего значения скорости ветрового потока в интервал от 7,8 до 10,8 м/с».

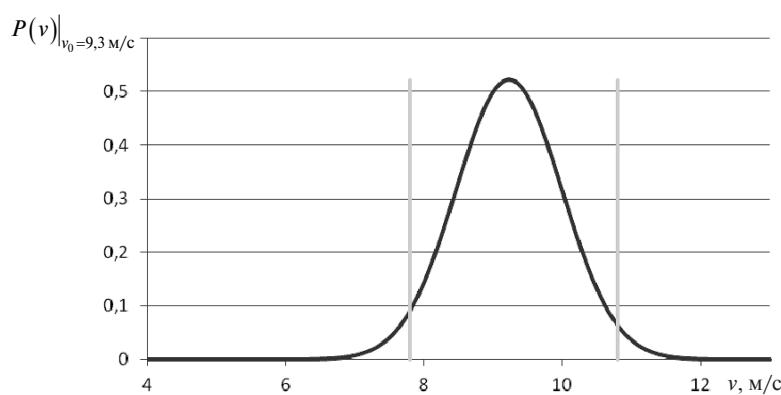


Рис. 2. График функции распределения вероятности скорости ветра при текущем значении скорости, равном 9,3 м/с

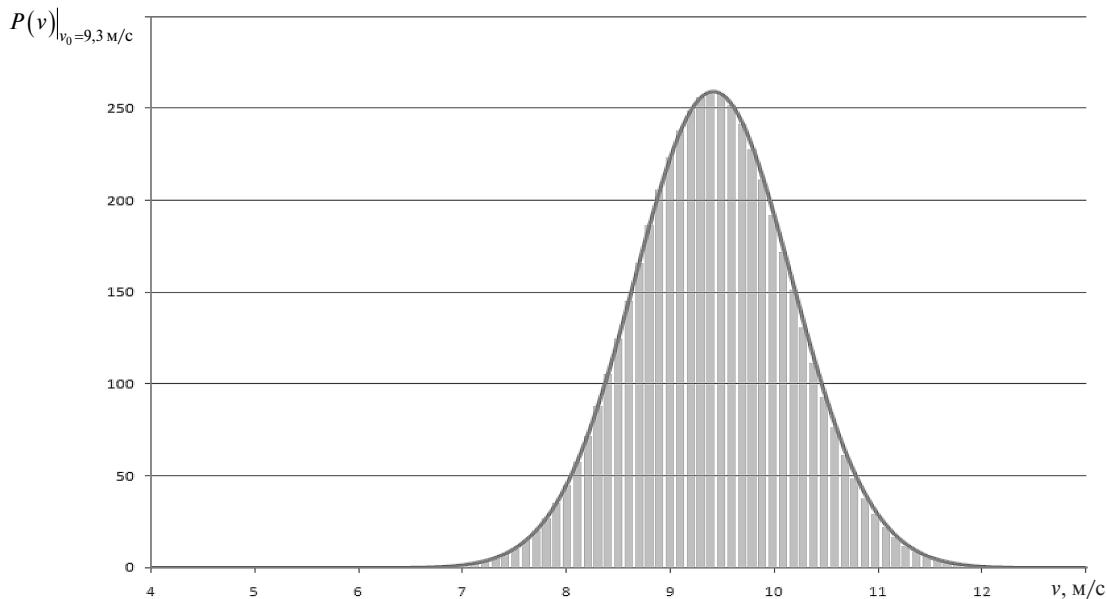


Рис. 3. Использование численных методов для расчета мощности ветрового потока

Полученные законы представляют собой систему функций распределения, зависимых от текущей скорости ветра, для которых определены интервалы перехода скорости ветра с заданной надежностью. Таким образом, для конкретного региона получена система функций распределения скоростей ветра, представляющая собой вероятностную модель ветра. Данную вероятностную модель следует использовать для прогнозирования выдаваемой мощности, которая определяется по формуле удельной мощности ветрового потока

$$N_{v_0} = 0,613 \int_{v_{\text{эфф min}}}^{v_{\text{эфф max}}} v^3 P_{v_0} (v - v_0) dv, \quad (6)$$

где  $v_{\text{эфф min}}$  и  $v_{\text{эфф max}}$  — границы скоростей ветра энергетически эффективной части ветрового потока;  $v - v_0$  — приращение скорости ветра при текущей скорости, равной  $v_0$ ;  $P_{v_0}$  — функция распределения приращения скорости ветра при текущей скорости равной  $v_0$ .

Учитывая ресурсоемкость и сложность вычисления интеграла, что необходимо для пере-

хода от повторяемости скорости ветра к мощности, настоятельно рекомендуется использовать численные методы с эффективным шагом вычисления (рис. 3).

Для приведенного примера (о. Русский) прогнозируемая удельная мощность ветрового потока за интервал времени 10 мин при текущей скорости ветра 9,3 м/с равна 491,6 Вт/м<sup>2</sup>. При этом мгновенная мощность ветрового потока для скорости ветра 9,3 м/с равна 477,5 Вт/м<sup>2</sup>. Между тем среднегодовая удельная мощность, рассчитанная без учета внутриядовой связи, равна 288,5 Вт/м<sup>2</sup>. Расхождение прогнозируемой мощности с реальной менее 5 %, тогда как при расчете по среднегодовым значениям скоростей ветра это расхождение составляет 40 %.

Статья подготовлена в рамках работы по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (ГК № 02.740.11.0750) и ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» (ГК № 16.516.11.6107).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гнеденко, Б.В. Курс теории вероятности [Текст] / Б.В. Гнеденко.— 8-е изд. доп. и испр.— М.: Едиториал УРСС, 2005. — 448 с.
2. Вентцель, Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения [Текст] / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров.— М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1991. (Физико-математическая б-ка инженера.)— 384 с.
3. Kusiak, A. Short-Term Prediction of Wind Farm Power: A Data Mining Approach [Текст] / A. Kusiak,



H. Zheng, Z. Song // IEEE Transactions on energy conversion.— 2009. Vol. 24, № 1.— 12 с.

4. **Рыхлов, А.Б.** Анализ применения различных законов распределения для выравнивания скоростей ветра на юго-востоке европейской территории России [Текст] / А.Б. Рыхлов // Известия Саратовского университета. Серия: Науки о Земле.— 2010. Т. 10, вып. 2.

5. **Елистратов, В.В.** Теоретические основы нетрадиционной и возобновляемой энергетики. Ч. 1.

Определение ветроэнергетических ресурсов региона [Текст]: Методические указания / В.В. Елистратов, М.В. Кузнецов.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003.— 55 с.

6. **Ходасевич, Г.Б.** Обработка экспериментальных данных на ЭВМ [Текст]: Учебное пособие / Г.Б. Ходасевич.— СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. Бонч-Бруевича., 2002.— 119 с.

# ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 614.84 (063)

*А.Н. Попов, М.Н. Полищук*

## **АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РУКАВНЫХ СПАСАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ**

Одним из наиболее эффективных средств спасения людей из высотных зданий при чрезвычайных ситуациях (ЧС), особенно в условиях массового скопления людей, считается рукавное спасательное устройство (РСУ). Учитывая особую значимость проблемы ликвидации ЧС, практически полное отсутствие аналитических работ по оценке применения защитных средств, в частности РСУ, а также то, что в СПбГПУ расположен испытательный полигон Министерства образования России по МЧС, исследование эффективности использования средств спасения и способов ее повышения в нашем вузе весьма актуально.

В России наибольшее распространение получили обжимные спасательные рукава. Они состоят из прочного и нерастяжимого внутреннего слоя и эластичного наружного слоя. Принцип работы РСУ (рис. 1) основан на создании значительной силы трения при обжатии эластичной тканью движущегося в рукаве тела.

Скоростью спуска легко управлять разведением или сведением локтей и коленей. Не способного двигаться самостоятельно можно спускать на плечах физически здорового человека, ребенка — прижать к груди взрослого человека. Спасатели могут управлять скоростью и траекторией спуска путем закручивания или оттягивания рукава.

РСУ может быть размещено снаружи или внутри здания и иметь входы с нескольких уровней одновременно. Рукав хранится в сложенном виде внутри контейнера и развертывается при необходимости. Разработаны различные конструкции, обеспечивающие возможность установки рукавов на фасадах зданий: в проемах окон, на балконах и лоджиях, на кровлях [1].

Процесс эвакуации людей с использованием РСУ можно условно разбить на два этапа. Первый начинается при получении сигнала тревоги и включает все действия людей (одевание, сбор вещей и документов, движение по коридору

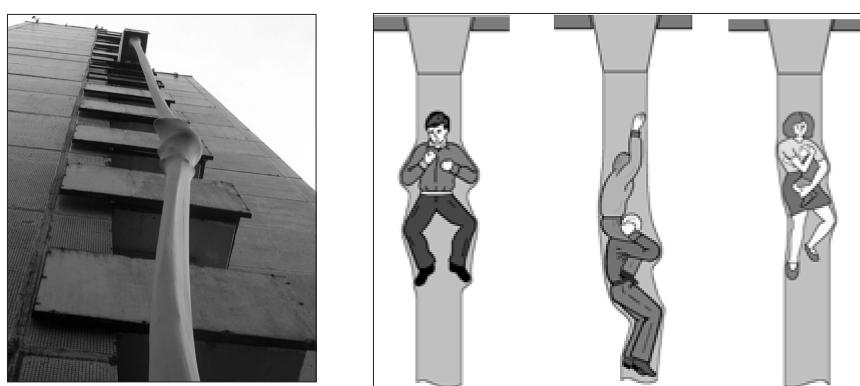


Рис. 1. Спасательный рукав



и т. д.) вплоть до выхода на площадку перед рукавом. Второй период включает загрузку в рукав, движение по нему, приземление и выход в безопасную зону. Ясно, что на результаты эвакуации влияют прежде всего быстрота выхода к площадке, загрузки в рукав и выхода из него после приземления, скорость спуска и грузоподъемность рукава. Для оценки эффективности и выработки рекомендаций по наиболее рациональному применению спасательных средств можно использовать методы аналитического и имитационного моделирования.

На рис. 2 приведена сетевая модель системы ликвидации ЧС. Узлы сети: 1 — площадка для загрузки в РСУ; 2 — площадка для выгрузки из рукава; 3 — безопасное место. Векторы  $\gamma$ ,  $\mu$ ,  $m$ ,  $\beta$ ,  $R$  характеризуют интенсивности внешних входных потоков и обслуживания заявок, состав сети, внешний поток, допустимое количество заявок в узлах;  $P$  — матрица передач.

Оценить характеристики системы без детализации описания дискретных процессов можно с помощью моделей объемного баланса.

**Пример 1.** Рассчитаем коэффициенты использования позиций загрузки в спасательный рукав и выхода из рукава при интенсивности потока эвакуируемых  $\gamma_1 = 10 \text{ мин}^{-1}$ .

Считаем, что доля людей, которые не смогли добраться до площадки перед рукавом, равна  $\beta_1 = 0,05$ , доля людей, которые не смогли выйти из рукава  $\beta_2 = 0,01$ , время загрузки в рукав  $T_1 = 5 \text{ с}$ , время выхода из рукава  $T_2 = 5 \text{ с}$ .

Из модели (см. рис. 2) ясно, что  $p_{12} = 1 - \beta_1 = 0,95$ ,  $p_{23} = 1 - \beta_2 = 0,99$ . На основе уравнения баланса сети определяем интенсивности входных потоков:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \gamma_1; \\ \lambda_2 = p_{12}\lambda_1; \\ \lambda_3 = p_{23}\lambda_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lambda_1 = 10; \\ \lambda_2 = 9,5; \\ \lambda_3 = 9,405. \end{cases}$$

Интенсивности обслуживания:  $\mu_1 = 1/T_1 = 12 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\mu_2 = T_2 = 12 \text{ 1/мин}^{-1}$ ,  $\mu_3 = \infty$  (считаем, что при выходе в безопасное место нет никаких

ограничений ни по времени, ни по пространству). Коэффициенты занятости позиций:  $\rho_1 = \lambda_1/\mu_1 m_1 = 5/6$ ,  $\rho_2 = 19/24$ ,  $\rho_3 = 0$ . Условия существования стационарного режима ( $\rho_i \leq 1$ ) выполнены. Наиболее напряженной является позиция погрузки в рукав.

**Пример 2.** Рассчитаем запуск (интенсивность внешнего потока в узел 1), при котором в системе не будет накапливаться очередь.

Так как наиболее загруженным является узел 1, а условие отсутствия очереди имеет вид  $\rho_1 \leq 1$ , то получаем  $\lambda_1 \leq \mu_1$ , откуда  $\gamma_1 = \lambda_1 \leq \mu_1 = 12 \text{ мин}^{-1}$ . Следовательно, наибольший поток эвакуируемых на позицию перед рукавом, при котором не будет возникать очередь, равен 12 чел/мин.

Из теории [1] известно выражение, определяющее максимально возможную фактическую производительность:

$$\bar{Q}_\Phi = \gamma_0^* \sum_{i \in I} \varepsilon_i \beta_i; \\ \gamma_0^* = \max_{\gamma_0} \{ \gamma_0 : \gamma_0 \leq m_i \mu_i / \varepsilon_i, i = 1, \dots, n \},$$

где  $\gamma_0^*$  — максимально возможный поток заявок;  $I$  — множество «выходных» узлов, исключая узлы, из которых удаляется «брак» (в нашем случае — травмированные люди);  $\varepsilon_i$  удовлетворяют системе уравнений  $\varepsilon_i = \bar{\gamma}_i + \sum_{j=1}^n p_{ji} \varepsilon_j$ ,  $i = 1, \dots, n$ , а значение  $\bar{\gamma}_i$  имеет смысл доли суммарного внешнего потока, которая начинает обслуживаться в  $i$ -м узле.

**Пример 3.** Определим максимально возможную производительность системы эвакуации людей с помощью спасательного рукава.

Так как внешний входной поток имеется только в узле 1, то  $\bar{\gamma}_1 = 1$ ,  $\bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma}_3 = 0$ . Система уравнений для определения  $\varepsilon_i$  примет вид

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = 1; \\ \varepsilon_2 = p_{12}\varepsilon_1; \\ \varepsilon_3 = p_{23}\varepsilon_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_1 = 1; \\ \varepsilon_2 = 0,95; \\ \varepsilon_3 = 0,94. \end{cases}$$

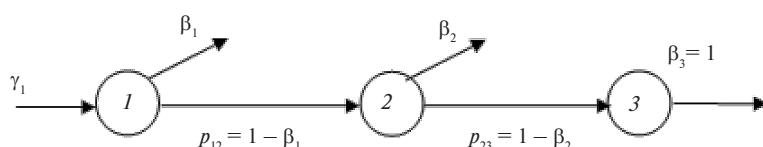


Рис. 2. Сетевая модель системы ликвидации ЧС



Значение максимальной фактической производительности получается таким:

$$\gamma_0^* = \min \{m_i \mu_i / \varepsilon_i\} = 12 \text{ чел/мин},$$

$$\bar{Q}_\Phi = \gamma_0^* \varepsilon_3 \beta_3 = 11,286 \text{ чел/мин.}$$

Для увеличения производительности системы может быть использован метод «расшивки узких мест», согласно которому в узел, являющийся «узким местом», добавляют еще один агрегат и определяют «узкое место» при новых условиях. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнута необходимая производительность.

**Пример 4.** «Спроектируем» систему с фактической производительностью 20 чел/мин.

Поскольку при заданных интенсивностях обслуживания в узлах и количествах агрегатов  $m = (1, 1, 1)^T$  «узким местом» является узел 1, то добавляем в этот узел один агрегат и получаем

$$\gamma_0^* = m_2 \mu_2 / \varepsilon_2 = 12,6 \text{ чел/мин},$$

$$\bar{Q}_\Phi = \gamma_0^* \varepsilon_3 \beta_3 = 11,9 \text{ чел/мин.}$$

Требуемая производительность не достигнута. Теперь «узким местом» стал узел 2. Добавляя в него второй агрегат (второй рукав), получим

$$\gamma_0^* = m_1 \mu_1 / \varepsilon_2 = 24 \text{ чел/мин},$$

$$\bar{Q}_\Phi = \gamma_0^* \varepsilon_3 \beta_3 = 22,6 \text{ чел/мин.}$$

Итак, чтобы при принятых значениях интенсивности входного потока, времени загрузки и выгрузки из РСУ обеспечить фактическую производительность системы 20 чел/мин, следует использовать два спасательных рукава либо один с более высокой производительностью или сделать более удобными вход и выход из имеющегося рукава.

Балансовые модели отличаются простотой, но выводы, основанные только на объемных расчетах, могут оказаться неправильными, т. к. не учитывают дискретность процессов, неритмичность работы элементов. Для учета нестабильности процессов используются вероятностные математические модели на основе теории массового обслуживания (ТМО).

В рассматриваемой системе ликвидации ЧС с помощью РСУ параметры системы массового

обслуживания (СМО), представляемой в форме Кендалла  $A/B/m/R/N/d$  [2], интерпретируются следующим образом:

канал или агрегат СМО — обжимной рукав (или площадки для загрузки в рукав и выгрузки из него);

заявка или требование — эвакуируемый человек;

$R$  — количество людей, которые прибыли на позицию эвакуации и могут ожидать момента, когда рукав окажется доступен;

$N$  — количество людей, которые должны быть эвакуированы;

$d$  — для ЧС, как правило, характерна дисциплина *FIFO* (обслуживается первый поступивший);

$A(t)$  — показательная функция распределения интервалов времени между поступлениями людей к средству эвакуации;

вид функции распределения длительности обслуживания  $B(t)$  связан с «производительностью» спасательного рукава и различными влияющими факторами, в частности, с надежностью рукава, физической и психологической подготовкой эвакуируемых, их возрастом, полом и т. д.

Сначала рассмотрим модели, описывающие основной вариант эвакуации, — с одним спасательным рукавом. Для исследования важно знать интенсивность прибытия людей на площадку перед РСУ. Наилучшие результаты в случае большой неопределенности характеристик дает использование экспоненциального распределения, которое характеризуется только одним параметром — средним значением. Время загрузки в рукав также является случайным, но здесь все определяется в основном только подготовкой человека.

Далее считаем интервал между появлениеми людей на площадке перед рукавом случайной величиной, имеющей экспоненциальный закон распределения со средним  $T_1$ , время загрузки в РСУ — экспоненциально распределенной случайной величиной со средним  $T_2$ .

Приходим к следующей модели. К спасательному рукаву поступает «поток людей» с экспоненциальным распределением интенсивности  $\lambda = 1/T_1$ . Процесс загрузки в рукав также имеет экспоненциальное распределение с интенсивностью (средний темп)  $\mu = 1/T_2$ . Подобная модель в точности соответствует аналитической



модели СМО вида  $M/M/1$ . В частности, при  $T_1 = 10$  с,  $T_2 = 5$  с получаем [2]:

коэффициент загрузки позиции перед рукавом  $\rho = \lambda/\mu = 0,5$ ;

среднее суммарное число людей, находящихся в данный момент на площадке и в рукаве,  $\bar{u} = \rho/(1-\rho) = 1$ ;

среднее число людей, находящихся в очереди на загрузку в рукав,  $\bar{v} = \rho^2/(1-\rho) = 0,5$ ;

среднее время пребывания в системе  $\bar{\theta} = \bar{u} / \lambda = 10$  с;

среднее время ожидания момента загрузки в рукав  $\bar{\vartheta} = \bar{v} / \lambda = 5$  с.

Анализ позволяет сделать следующие выводы:

коэффициент загрузки быстро растет при сближении значений  $T_1$  и  $T_2$ . При этом увеличиваются очереди на загрузку в спасательный рукав и время ожидания этой загрузки;

среднее время  $T_2$  загрузки в рукав должно быть меньше среднего интервала  $T_1$  между «прибытиями» людей на позицию загрузки. Иначе люди будут скапливаться на позиции перед рукавом, что может привести к дополнительным проблемам ввиду ограниченного размера площадки;

при времени загрузки в рукав  $T_2 = 5$  с максимальная пропускная способность рукава составит не более 12 человек в минуту. Этого может оказаться недостаточно для эвакуации всех людей. Поэтому должны быть предприняты дополнительные меры по увеличению пропускной способности, например создание еще одного «канала спасения» со вторым рукавом либо улучшение «технологии загрузки» людей в рукав.

Один из возможных вариантов действий спасателей при ЧС — управление потоком эвакуемых из здания. В частности, можно предусмотреть «отсечение» людского потока от рукава так, чтобы загрузка происходила строго равномерно, через детерминированное время  $T_2$ . В этом случае для анализа характеристик может быть использована модель СМО вида  $M/D/1$  и следующие значения характеристик [2]:

среднее значение числа требований в системе

$$\bar{u} = \rho(2-\rho) / 2(1-\rho);$$

при  $\rho = 0,5$  получается  $\bar{u} = 0,75$ ;

среднее количество заявок в очереди на обслуживание

$$\bar{v} = \rho^2 / 2(1-\rho); \text{ при } \rho = 0,5 \text{ будет } \bar{v} = 0,5;$$

среднее время пребывания в системе

$$\bar{\theta} = (2-\rho)T_2 / 2(1-\rho);$$

при  $\rho = 0,5$  и  $T_2 = 5$  имеем  $\bar{\theta} = 0,5$  с;

среднее время ожидания обслуживания

$$\bar{\vartheta} = \rho T_2 / 2(1-\rho);$$

при  $\rho = 0,5$  и  $T_2 = 5$  получаем  $\bar{\vartheta} = 5$  с.

Сравнение с моделью  $M/M/1$  показывает, что при детерминированном «потоке через рукав» среднее количество эвакуирующихся и среднее время эвакуации уменьшаются по сравнению с экспоненциальным потоком в  $(2-\rho)/2$  раз, а средняя очередь и среднее время пребывания в очереди к спасательному рукаву — в 2 раза. Так что при большой загрузке рукава ( $\rho \rightarrow 1$ ) управление потоком людей будет весьма эффективным.

Влияние на общие характеристики неопределенности (разброс) времени загрузки в спасательный рукав рассмотрим на примере нормального закона распределения этой случайной величины со средним значением  $T_2$  и дисперсией  $\sigma^2$ . Имеем классический случай модели СМО типа  $M/G/1$ , причем коэффициент вариации  $c_x = \sigma/T_2$ . Основные характеристики вычисляются по следующим формулам [2]:

среднее значение числа требований в системе

$$\bar{u} = \rho + \rho^2(1+c_x^2) / 2(1-\rho);$$

при  $\rho = 0,5$  и  $c_x = 1$  получается  $\bar{u} = 0,76$ ;

среднее количество заявок в очереди на обслуживание

$$\bar{v} = \rho^2(1+c_x^2) / 2(1-\rho);$$

при  $\rho = 0,5$  и  $c_x = 1$  оказывается  $\bar{v} = 0,26$ ;

среднее время пребывания в системе

$$\bar{\theta} = T_2 + \rho T_2(1+c_x^2) / 2(1-\rho);$$

при  $\rho = 0,5$  и  $T_2 = 5$  будет  $\bar{\theta} = 7,6$  с;

среднее время ожидания обслуживания

$$\bar{\theta} = \rho T_2 (1 + c_x^2) / 2(1 - \rho);$$

при  $\rho = 0,5$  и  $T_2 = 5$  имеем  $\bar{\theta} = 2,6$  с.

При увеличении коэффициента вариации характеристики очередей и времени эвакуации растут квадратично (с увеличением дисперсии — линейно). Например, при изменении коэффициента вариации от 0 до  $2T_2$  среднее количество людей в очереди на загрузку изменяется с 0,25 до 1,25, а время пребывания в очереди — с 7,5 до 17,5 с.

Эффективность использования дополнительного спасательного рукава может быть исследована на модели СМО вида  $M/M/m$  с числом агрегатов  $m = 2$ . При  $T_1 = 10$  с,  $T_2 = 5$  с получаем следующие характеристики:

коэффициент занятости позиций загрузки  $\rho = \lambda/m\mu = 0,25$ ;

вероятность того, что нет эвакуирующихся людей на площадках перед рукавами и загружающихся в них, равна

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^{m-1} \frac{(m\rho)^k}{k!} + \frac{(m\rho)^m}{m!(1-\rho)^2}} = \frac{1}{1 + 2\rho + \frac{(2\rho)^2}{2!(1-\rho)^2}} = 0,581;$$

среднее суммарное число людей, находящихся в данный момент на площадках и на загрузке в рукава, находится по формуле

$$\bar{u} = p_0 \left[ \sum_{k=1}^{m-1} \frac{(m\rho)^k}{(k-1)!} + \frac{(m\rho)^m (\rho + m - m\rho)}{m!(1-\rho)^2} \right] = p_0 \left( 2\rho + \frac{(2\rho)^2 (2-\rho)}{2!(1-\rho)^2} \right) = 0,484;$$

среднее число людей, находящихся в очереди на загрузку в рукава, равно

$$\bar{v} = p_0 \left[ \frac{\rho(m\rho)^m}{m!(1-\rho)^2} \right] = p_0 \frac{\rho(2\rho)^2}{2!(1-\rho)^2} = 0,032;$$

среднее время загрузки (с ожиданием)  $\bar{\theta} = \bar{u} / \lambda = 4,84$  с.

среднее время ожидания загрузки в рукав  $\bar{\theta} = \bar{v} / \lambda = 0,32$  с.

Выводы из полученных результатов очевидны: наличие второго рукава значительно уменьшает сами очереди и время пребывания в них. Особенно эффективна эта мера при больших коэффициентах загрузки.

Учтем теперь еще одно весьма важное ограничение. Площадка, где развернуто РСУ, может не вместить всех желающих, например если она располагается на балконе жилого дома. При скоплении людей возможна паника, что также приведет к негативным последствиям.

Указанная ситуация соответствует модели СМО типа  $M/M/1/R$  ( $R$  — емкость накопителя). Из теории известно, что вероятность потери требований (или вероятность блокировки) в такой модели определяется формулой  $p_{\text{бл}} = p_R = \rho^R (1 - \rho) / (1 - \rho^{R+1})$ .

Потеря требований означает гибель людей. Поэтому значение  $p_{\text{бл}}$  необходимо сделать близким к нулю. Необходимая емкость накопителя, обеспечивающая вероятность блокировки не выше заданного значения  $\bar{p}$ , составляет  $R = \ln(\bar{p}) / (1 - \rho + \bar{p}\rho) / \ln \rho$ . При  $\bar{p} = 0,001$  и  $\rho = 0,5$  будет  $R = 10$ .

Увеличение емкости накопителя дает определенный положительный эффект, и этот эффект тем больше, чем выше коэффициент загрузки позиций. Эффект этот проявляется в том, что заявки (люди) не пропадут, а дождутся своей очереди в накопителе (на площадке).

Процесс спуска людей в спасательном рукаве также имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при исследовании системы ликвидации ЧС. Основные из этих особенностей:

возможность движения людей при спуске с разными скоростями;

значительный разброс скоростей по величине; ограниченная грузоподъемность рукава.

Первые два фактора приводят к тому, что люди в процессе движения могут догонять друг друга, двигаясь далее группой, а это может привести к травмам и усложнить выход из рукава после приземления. Из-за разности скоростей при движении несколько человек могут приземлиться «друг у друга на голове». Ясно, что в таком случае покинуть рукав будет гораздо сложнее. Ограничения грузоподъемность РСУ накладывает ограничение на максимальное ко-



личество людей, которые могут находиться в нем одновременно.

Если бы не эти причины, то процесс движения эвакуируемых людей в спасательном рукаве можно было рассматривать просто как временную задержку (на время спуска), которая увеличивает время пребывания в системе, но не влияет на очереди и производительность системы. Понятно, что такой подход неправомерен, поэтому предлагается следующий «выход из положения».

Считаем далее, что люди, достигнув земли, не просто выходят из спасательного рукава, а попадают на некую условную позицию, которую назовем «площадкой выгрузки из рукава». Чтобы воспользоваться этой позицией и выйти из рукава в безопасное место, нужно некоторое время. Значение этого времени — случайная величина, т. к. зависит от положения (ориентации), в котором человек приземлился, его координации движений и физических качеств, от того, свободна ли площадка, прибыл человек один или в составе группы и т. д.

Если рассуждать в терминах ТМО, получается, что время обслуживания людей на агрегата-

те («площадка выгрузки из рукава») — случайно. Понятно, что и входной поток, определяемый темпом подхода пострадавших к рукаву и временем загрузки в рукав, также является неравномерным. По поводу характера законов, описывающих эти случайные величины, как и ранее, ничего определенного сказать нельзя. Поэтому наиболее рационально принять потоки пуассоновскими. При такой постановке вопроса исследование может быть выполнено на тех моделях, которые уже описаны выше. Повторять по ним расчеты снова не целесообразно, все зависимости и выводы приведены и могут быть использованы.

В заключение отметим, что основные оценки и выводы в данной статье были получены на основе моделей и методов ТМО. Эти методы хорошо «работают» при наличии установившихся режимов исследуемой системы, что далеко не всегда соответствует развитию ЧС. Ряд задач предполагает анализ переходных процессов и требует отдельного рассмотрения, в частности с помощью теории вероятностей и имитационного моделирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постнов, В. Эвакуация из здания. (Проблемы и решения) [Текст] / В. Постнов, С. Орищенко, Ю. Шевченко // Мир и безопасность.— 2006. № 6 и 2007. № 1.
2. Ганин, Н.М. Математические модели автоматизированных производственных систем [Текст]: Учеб. пособие / Н.М. Ганин, В.А. Катковник, М.Н. Полищук.— Л., Изд-во Ленингр. гос. техн. ун-та. 1991. — 76 с.

УДК 563.253

Д.В. Гоздяков, В.Е. Губин, Г.В. Кузнецов

## ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ФОРМИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ АТМОСФЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Существенный вклад в процесс образования серной кислоты в пограничном слое атмосферы вносят тепловые электрические станции (ТЭС) [1]. При сжигании топлив в окружающую среду поступают различные загрязняющие вещества [2]. Большинство из них относится к числу токсичных и даже при сравнительно невысоких

концентрациях оказывают вредное воздействие на природу и человека [1–5]. В табл. 1 приведены значения допустимых объемов некоторых загрязняющих веществ, содержащихся в дымовых газах ТЭС.

В данной работе рассматривается серный ангидрид  $\text{SO}_3$ , который образуется в газоходах

Таблица 1

Допустимые концентрации, мг/м<sup>3</sup>, загрязняющих веществ [3]

Страна	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	Твердые частицы
Россия	2000–3400	320–700	100–500
Япония	550	205–980	50–300
США	740–1480	605–980	40–125
Франция	400–2000	650–1300	50–100
Германия		200–1500	50–150

котлов ТЭС путем частичного окисления SO<sub>2</sub> (до 5 % от общей доли SO<sub>2</sub>) при сжигании высокосернистых топлив и относится к классу умеренно опасных продуктов сгорания натуральных топлив ТЭС. При взаимодействии серного ангидрида с водяным паром, который относится к парниковым газам, в определенных условиях образуется серная кислота. Под действием природных факторов она может конденсироваться и выпадать на поверхности земли и растений [3].

Несмотря на высокую опасность этого антропогенного процесса и достаточно большое внимание, уделяемое проблеме кислотных дождей [4, 5], до настоящего времени не разработана теория процессов формирования паров и капель различных кислот в атмосфере.

Целью нашей работы была численная оценка условий образования серной кислоты в пограничном слое атмосферы при различных метеорологических условиях.

#### Постановка задачи и метод решения

Рассматривается стационарный источник выбросов высотой  $H_{ист}$  (газоотводящая труба ТЭС) с объемной концентрацией загрязняющих веществ ( $C_{SO_3}$  и  $C_{H_2O}$ ) на выходе из устья. В исследуемой области ось  $x$  ориентирована по направлению ветра в пограничном слое. Выбрасываемый в атмосферу дымовой газ считается ньютоновской жидкостью, несжимаемой и удовлетворяющей приближению Буссинеска. Движение дымовых газов и тепломассоперенос в рассматриваемой области считаются двумерными. Область решения представлена на рис. 1.

Процесс образования и распространения серной кислоты зависит от следующих факторов: температуры окружающего воздуха; температуры дымовых газов ТЭС; скорости перемещения

воздушных масс; скорости истечения дымовых газов из устья источника; фоновой концентрации водяного пара в атмосфере; концентрации водяного пара в дымовых газах ТЭС.

Механизм образования серной кислоты основан на взаимодействии, при котором серный ангидрид SO<sub>3</sub> поглощается водяным паром [5]:



Процесс взаимодействия SO<sub>3</sub> и H<sub>2</sub>O протекает практически мгновенно и в совокупности с метеорологическими условиями определяет интенсивность выпадения продуктов окисления в зоне антропогенных источников.

Приняты следующие условия образования серной кислоты:

- 1) достижение дымовыми газами ТЭС, содержащими водяной пар, состояния насыщения;
- 2) достижение текущей абсолютной влажности газов максимального значения при данной температуре [4, 5].

Выполнение этих условий обеспечивает образование серной кислоты в воздушном пространстве.

При разработке математической модели учитывались следующие процессы:

- 1) перенос газообразных продуктов сгорания ТЭС конвекцией и диффузией;
- 2) теплофизические и химические процессы, приводящие к изменению концентрации первичных антропогенных соединений и химического состава воздушного потока.

В работе используется математическая модель, описывающая изменение концентрации и температуры продуктов сгорания натуральных топлив ТЭС и участки, на которых будет происходить образование серной кислоты в пограничном слое атмосферы.



Процесс переноса энергии, количества движения и массы в рассматриваемых условиях описывается системой нестационарных уравнений Навье — Стокса [6–8]. Считается, что температура и концентрация на источнике не зависят от времени. Для моделирования изменения абсолютной концентрации использованы нестационарные двумерные уравнения смешанной конвекции в приближении Буссинеска [7].

Безразмерные уравнения Навье — Стокса в приближении Буссинеска в переменных «вихрь скорости — функция тока — температура — концентрация» имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Omega}{\partial X} + V \frac{\partial \Omega}{\partial Y} &= \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} \right) + \frac{\text{Gr}}{\text{Re}^2} \frac{\partial \Theta}{\partial X}; \\
 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} &= \Omega; \\
 \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Theta}{\partial X} + V \frac{\partial \Theta}{\partial Y} &= \frac{1}{\text{Pr} \text{Re}} \left( \frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2} \right); \\
 \frac{\partial C_{\text{SO}_3}}{\partial \tau} + U \frac{\partial C_{\text{SO}_3}}{\partial X} + V \frac{\partial C_{\text{SO}_3}}{\partial Y} &= \\
 &= \frac{1}{\text{Pr} \text{Sc}} \left( \frac{\partial^2 C_{\text{SO}_3}}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C_{\text{SO}_3}}{\partial Y^2} \right); \\
 \frac{\partial C_{\text{H}_2\text{O}}}{\partial \tau} + U \frac{\partial C_{\text{H}_2\text{O}}}{\partial X} + V \frac{\partial C_{\text{H}_2\text{O}}}{\partial Y} &= \\
 &= \frac{1}{\text{Pr} \text{Sc}} \left( \frac{\partial^2 C_{\text{H}_2\text{O}}}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C_{\text{H}_2\text{O}}}{\partial Y^2} \right). \quad (2)
 \end{aligned}$$

В качестве масштаба расстояния выбрана длина рассматриваемой области решения по оси  $x$ . Для приведения к безразмерному виду системы уравнений использованы следующие соотношения:

$$X = x/l; Y = y/l; \tau = t/t_0; U = u/U_u; V = v/U_u;$$

$$V_r = v_r/U_u; H_1 = h_1/h;$$

$$H_u = h_u/h; L_1 = l_1/l; L_2 = l_2/l; L_3 = l_3/l;$$

$$\Theta = (T - T_0)/(T_u - T_0); \Psi = \psi/\psi_0;$$

$$\Omega = \omega/\omega_0, \psi_0 = U_u l, \omega_0 = U_u/l,$$

$$C_{\text{SO}_3} = (C'_{\text{SO}_3} - C'_{0\text{SO}_3}) / (C_{\text{SO}_3\text{и}} - C'_{0\text{SO}_3\text{и}});$$

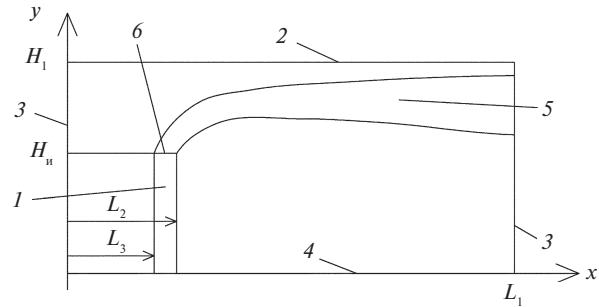


Рис. 1. Область решения задачи:

1 — газоотводящая труба; 2 — верхняя горизонтальная граница области решения; 3 — вертикальные границы области решения; 4 — подстилающая поверхность; 5 — дымовой факел; 6 — участок истечения дымовых газов

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = (C'_{\text{H}_2\text{O}} - C'_{0\text{H}_2\text{O}}) / (C_{\text{H}_2\text{Oи}} - C'_{0\text{H}_2\text{Oи}}),$$

где  $x, y$  — координаты декартовой системы координат;  $X, Y$  — безразмерные координаты, соответствующие координатам  $x, y$ ;  $l, h$  — длина и высота газовой полости рассматриваемой области решения по осям  $x$  и  $y$ ;  $l_2, l_3$  — геометрические размеры, характеризующие месторасположение источника загрязнения;  $h_u$  — высота источника загрязнения;  $t$  — время;  $T_u$  — температура дымовых газов на выходе из устья дымовой трубы;  $T_0$  — температура окружающей среды;  $C'_u$  — объемная концентрация серного ангидрида на выходе из устья дымовой трубы;  $C'_{0\text{SO}_3}$  — объемная концентрация серного ангидрида в атмосфере промышленного района;  $C_{\text{H}_2\text{Oи}}$  — объемная концентрация водяного пара на выходе из устья дымовой трубы;  $C'_{0\text{H}_2\text{O}}$  — объемная концентрация водяного пара в атмосфере промышленного района;  $t_0$  — масштаб времени;  $\tau$  — безразмерное время;  $u, v$  — составляющие скорости в проекции на оси  $x, y$ , соответственно;  $v_r$  — скорость дымовых газов на выходе из устья дымовой трубы;  $U, V$  — безразмерные скорости, соответствующие скоростям  $u, v$ ;  $V_r$  — безразмерный аналог скорости дымовых газов на выходе из устья дымовой трубы;  $U_u$  — масштаб скорости (скорость перемещения воздушных масс);  $H_1$  — безразмерная высота;  $H_u$  — безразмерная высота источника загрязнения;  $L_1$  — безразмерная длина;  $\Theta$  — безразмерная температура;  $C_{\text{H}_2\text{O}}$  — безразмерная концентрация водяного пара;  $\psi$  — функция тока;  $\psi_0$  — мас-



штаб функции тока;  $\Psi$  — безразмерный аналог функции тока;  $\omega$  — вихрь скорости;  $\omega_0$  — масштаб вектора вихря;  $\Omega$  — безразмерный аналог вектора вихря;  $Gr = (g\beta X^3(T_u - T_0))/v^2$  — число Грасгофа;  $\beta$  — температурный коэффициент объемного расширения;  $g$  — ускорение, создаваемое массовыми силами;  $X$  — характерный размер;  $v$  — коэффициент кинематической вязкости;  $Re = (U_u X)/v$  — число Рейнольдса;  $Pr = v/a$  — число Прандтля;  $a$  — коэффициент температуропроводности;  $Sc = v/D$  — число Шмидта;  $D$  — коэффициент диффузии.

Начальные условия для системы уравнений (2) в момент времени  $\tau = 0$  имеют вид

$$\begin{aligned} \Omega(X, Y, 0) &= 0; C(X, Y, 0) = 0; \\ \Psi(X, Y, 0) &= 0; U(X, Y, 0) = 0; \\ \Theta(X, Y, 0) &= 0; V(X, Y, 0) = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Границные условия:

$$\begin{aligned} X &= 0, 0 \leq Y \leq H_1, \frac{\partial \Psi}{\partial Y} = 1, \Omega = 0, \Theta = 0, C = 0; \\ X &= L_1, 0 \leq Y \leq H_1, \frac{\partial \Psi}{\partial X} = 0, \frac{\partial \Omega}{\partial X} = 0, \frac{\partial \Theta}{\partial X} = 0, \frac{\partial C}{\partial X} = 0; \\ X &= L_2, 0 \leq Y \leq H, \Psi = 0, \Omega = 0, \Theta = 0, \frac{\partial C}{\partial X} = 0; \\ X &= L_3, 0 \leq Y \leq H, \Psi = 0, \Omega = 0, \Theta = 0, C = 0; \\ Y &= 0, 0 \leq X \leq L_3, \Psi = 0, \Omega = 0, \Theta = 0, C = 0; \\ Y &= 0, L_3 \leq X \leq L_1, \Psi = 0, \Omega = 0, \Theta = 0, \frac{\partial C}{\partial Y} = 0; \\ Y &= H_u, L_2 \leq X \leq L_3, \frac{\partial \Psi}{\partial X} = V_r, \Omega = 0, \Theta = 1, \frac{\partial C}{\partial Y} = 1; \\ Y &= H_1, 0 \leq X \leq L_1, \Psi = H_1, \Omega = 0, \Theta = 0, \frac{\partial C}{\partial Y} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Границные условия для уравнения диффузии серного ангидрида и водяного пара идентичны.

Для решения задачи (1)–(4) использовался алгоритм, разработанный [10, 11] для решения задач свободной и смешанной конвекции методом конечных разностей при записи системы уравнений в переменных «функция тока — вихрь». Разностные аналоги дифференциальных

уравнений решены локально-одномерным методом [8]. Верификация метода расчета и алгоритма проведена по результатам решения аналогичных задач [12, 13].

### Анализ результатов численного моделирования

В качестве примера рассмотрены условия образования серной кислоты в открытом воздушном пространстве протяженностью 1000 м и высотой 400 м. Источник загрязнения — устье газоотводящей трубы тепловой электрической станции. Термофизические параметры дымовых газов на источнике считаются постоянными. Абсолютная концентрация водяного пара в атмосфере принималась равной 2000 мг/м<sup>3</sup>, серного ангидрида — 0,04 мг/м<sup>3</sup>. Концентрация водяного пара на срезе газоотводящей трубы — 3·10<sup>5</sup> мг/м<sup>3</sup>, серного ангидрида — 100 мг/м<sup>3</sup>. Температура наружного воздуха изменялась от 263 до 297 К, Температура дымовых газов на срезе газоотводящей трубы принималась равной 413 К, скорость ветра — 20 м/с. Типичные результаты численного моделирования с погрешностью  $\pm 50$  м для расстояний и  $\pm 0,1$  мг/м<sup>3</sup> для концентрации приведены в табл. 2.

Из анализа приведенных в таблице характеристик следует, что в различные термические периоды года выполнение условий образования серной кислоты начинается на различных расстояниях от источника поступления SO<sub>3</sub>. Так, например, в летний период при температуре наружного воздуха 297 К микрокапли серной кислоты начинают образовываться на расстоянии 100–200 м от источника загрязнения. Абсолютная концентрация серной кислоты в осадках при этом достигает 3 мг/м<sup>3</sup>. В зимний период образование осадков, содержащих серную кислоту, начинается на расстоянии 1400 м от источника загрязнения, содержание серной кислоты на таком расстоянии может достигать 2,5 мг/м<sup>3</sup>. В осенний и весенний период образование серной кислоты начинается почти на одинаковых расстояниях. Протяженность области возможного выпадения осадков находится в диапазоне 1650–1800 м. Абсолютная концентрация серной кислоты в осадках при этом составляет 1,5–3 мг/м<sup>3</sup>.

На рис. 2 представлены результаты численного моделирования в виде зависимости изменения границы возможного образования серной



Таблица 2

## Результаты численной оценки условий образования серной кислоты

Название параметра и единиц измерения	Значение параметра в указанный термический период			
	Весенний	Летний	Осенний	Зимний
Температура окружающей среды, К	284	297	280	263
Расстояние от источника загрязнения до области образования серной кислоты, м	1300	100–200	1350	1400
Протяженность области возможного выпадения осадков, м	1650	от 100–200 и далее	1800	от 1300 и далее
Концентрация серной кислоты в области возможного выпадения осадков, $\text{мг}/\text{м}^3$	3,0–1,5	3,0–0,04	2,5–1,5	2,5–0,04

кислоты от температуры. В исследуемом воздушном бассейне при температуре воздуха 263 К выполнение условий образования серной кислоты начинается на расстоянии 1400 м от антропогенного источника. В зависимости от термического периода содержание серной кислоты в области возможного выпадения кислотных осадков находится в диапазоне 0,04–3  $\text{мг}/\text{м}^3$ . На рис. 3 в виде диаграмм представлены диапазоны изменения абсолютной концентрации серной кислоты.

Из рис. 3 видно, что среднее значение абсолютной концентрации серной кислоты в различные периоды года находится в диапазоне 1,5–2,5  $\text{мг}/\text{м}^3$ .

Полученные результаты иллюстрируют возможность пространственного моделирования координат участков территорий, прилегающих к ТЭС, на которых возможно выпадение кислотных дождей в различные времена года. Для оценки площади участков возможного загрязнения достаточно информации о параметрах дымовых газов ТЭС и метеорологической обстановке в районе станции.

Проведена численная оценка выполнения условий образования серной кислоты в воздушном пространстве, прилегающем к тепловой электрической станции. Установлено, что протяженность участков, над которыми образуется серная кислота, зависит от времени года. Значение абсолютной концентрации серной кислоты при этом находится в диапазоне от 3 до 0,04  $\text{мг}/\text{м}^3$ .

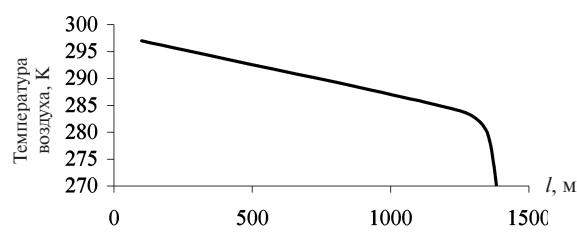


Рис. 2. Зависимость расстояния, на котором возможно образование серной кислоты от температуры воздуха

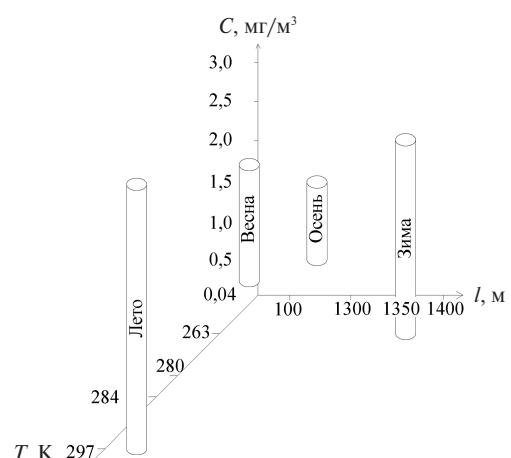


Рис. 3. Содержание серной кислоты в атмосфере в различное время года

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (ГК № П2225 от 11.11.2009).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 34.02.305—98. Методика определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС [Текст].— М.: ВТИ, 1998.— 76 с.
2. Внуков, А.К. Защита атмосферы от выбросов энергообъектов [Текст]: Справочник.— М.: Энергоатомиздат, 1992.— 176 с.
3. Путилов, В.Я. Анализ состояния и перспективы использования золошлаковых отходов тепловых электростанций [Текст] / В.Я. Путилов, К.П. Боричев, Б.Л. Вишня, В.М. Микушевич // Энергетик.— 1997. № 9. С. 12–13.
4. Заиков, Г.Е. Кислотные дожди и окружающая среда [Текст] / Г.Е. Заиков, С.А. Маслов, В.Л. Рубайло.— М.: Химия, 1991.— 144 с.
5. Израэль, Ю.А. Кислотные дожди [Текст] / Ю.А. Израэль, И.М. Назаров, А.Я. Прессман [и др.].— Л.: Гидрометеоиздат, 1989.— 270 с.
6. Роуч, П. Вычислительная гидродинамика [Текст] / П. Роуч.— М.: Мир, 1980.— 616 с.
7. Пасконов, В.М. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена [Текст] / В.М. Пасконов, В.И. Полежаев, Л.А. Чудов.— М.: Наука, 1984.— 288 с.
8. Берковский, Б.М. Вычислительный эксперимент в конвекции [Текст] / Б.М. Берковский, В.К. Полевиков.— Минск.: Университетское, 1988.— 167 с.
9. Самарский, А.А. Разностные схемы газовой динамики [Текст] / А.А. Самарский, Ю.П. Попов.— М.: Наука, 1975.— 424 с.
10. Kuznetsov, G.V. Conjugate natural convection with radiation in an enclosure [Текст] / G.V. Kuznetsov, M.A. Sheremet // International Journal of Heat and Mass transfer.— 2009.— Т. 52. № 9–10.— Р. 2215–2223.
11. Kuznetsov, G.V. Conjugate heat transfer in an enclosure under the condition of internal mass transfer and in the presence of the local heat source [Текст] / G.V. Kuznetsov, M.A. Sheremet // International Journal of Heat and Mass transfer.— 2009.— Т. 52. № 1–2.— Р. 1–8.
12. Кузнецов, Г.В. Двумерная задача естественной конвекции в прямоугольной области при локальном нагреве и теплопроводных границах конечной толщины [Текст] / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет // Известия РАН. Механика жидкости и газа.— 2006. № 6.— С. 29–39.
13. Кузнецов, Г.В. Сопряженный теплоперенос в замкнутой области с локально сосредоточенным источником тепловыделения [Текст] / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет // Инженерно-физический журнал.— 2006. Т. 79. № 1.— С. 5–6.

УДК 316.774

А.С. Крутолапов

## МЕТОДИКА ОБНАРУЖЕНИЯ И КОРРЕКЦИИ ПРЕРЫВАНИЙ ВНЕ ПРОТОКОЛА В СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ МЧС РОССИИ

Увеличивается число пользователей, количество и функциональность сетевых приложений, растет интенсивность информационного обмена и, как следствие, повышаются требования к производительности. Поэтому особое значение для обеспечения более высокого качества обслуживания приобретает задача повышения пропускной способности сетей передачи данных АСДУ ГПС МЧС России, что определяет необходимость разработки методики обнаружения и коррекции прерываний вне протокола.

Можно выделить два основных подхода к обработке прерываний по умолчанию:

при возникновении прерываний протокол не меняет состояние; прерывания либо игнорируются, либо выдается сигнал об ошибке, который должен обработать пользователь;

при прерываниях вне протокола запускается механизм восстановления от ошибок.

Первый способ имеет серьезный недостаток из-за времени, которое пользователь затратит на исправление ошибки, и не всегда



пользователь может иметь физический доступ к техническому средству, на котором возникла ошибка.

Основные методы восстановления после ошибок: перезапуск процесса в случае возникновения ошибки; уничтожение одного из двух процессов в случае, когда они претендуют на один и тот же ресурс.

Перезапуск процесса не гарантирует, что ошибка не повторится снова. В результате может возникнуть циклическое возникновение ошибок, что приводит к блокировке работы протокола. Уничтожение же одного из двух процессов может привести к потере данных.

Рассмотрим случай возникновения прерывания вне протокола для системы удаленного доступа VNC (Virtual Network Computing). Происходит установка систем VNC на две различные рабочие станции. При соединении каждой станции к рабочему столу другой происходит рекурсивное зацикливание. При этом потребление ресурсов увеличивается, что может привести к сбою.

**Виды прерываний вне протокола.** При исполнении последовательности действий, предписанных любым протоколом, имеют место различные ошибки вследствие следующих причин [1–10]:

сбоев и отказов при передаче по каналам связи информационных массивов, содержащих данные пользователя, и служебных массивов, содержащих информацию управления;

сбоев и отказов технических средств узлов коммутации, действующих на информационные и служебные массивы при их обработке и пересылке;

параллельного выполнения ряда процессов, участвующих в реализациях протоколов и протекающих асинхронно из-за некорректного описания. Эта асинхронность и приводит к появлению неопределенных ситуаций.

Первые два источника ошибок, которые можно классифицировать как источники «физического» происхождения, изучены достаточно глубоко [5, 11]. В распоряжении разработчиков и исследователей протоколов имеется достаточно широкий набор методов их обнаружения и коррекции. Что касается третьего источника ошибок, являющихся по существу ошибками проектирования и результатом недостаточного

описания протоколов, то проблема его изучения возникла в ходе испытаний протоколов в реальных условиях эксплуатации сетей передачи данных АСДУ.

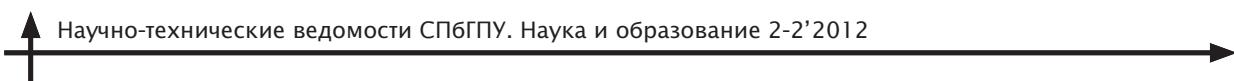
Этот источник вызывает появление в протоколах некорректностей, обусловленных действиями разработчиков, которые получили название прерываний вне протокола. Выявление таких прерываний осуществляется на этапах отладки, испытаний или при эксплуатации [12, 13]. Сущность же их использования состоит в том, что при реализации пользователем неописанных в документации действий он получает доступ к ресурсам сети передачи данных (СПД), которые в обычных условиях для него закрыты (например, вход в привилегированный режим обслуживания). Более того, ситуация неопределенности в протоколе может быть специально создана для того, чтобы получить несанкционированный доступ к определенным ресурсам и данным.

Анализ прерываний вне протоколов особенно важен для цифровых систем с интеграцией служб, так как цифровые каналы характеризуются существенно меньшей степенью группирования ошибок, чем используемые в настоящее время аналоговые каналы [14]. При организации служб, ориентированных на применение цифровых каналов, влияние источников ошибок «физического» происхождения сократится, тогда как интенсивность прерываний в общем случае останется такой же, как и в случае аналоговых каналов [4, 15, 16]. Обозначенная тенденция характерна для разработки любого программного обеспечения, базирующегося в значительной степени на квалификации и интуиции конкретного специалиста, и становится исключительно значимой для процессов информационного обмена [4, 11, 15].

Рассмотрим математические модели процессов возникновения прерываний вне протокола для СПД. Представим протокол информационного обмена  $C'$  конечным автоматом, удовлетворяющим следующим условиям:

имеется множество  $S'$  дискретных состояний  $C'$ , из которых выделяется одно исходное  $s'_0$  и по крайней мере одно финальное состояние  $s'_p$ ;

в любом из состояний, за исключением  $s'_p$ , есть один или более путей перехода в множество других состояний  $s'_i$ ;



любое состояние множества  $S'$  может быть достигнуто из  $s'_0$  по некоторой цепи переходов;

каждый переход  $s'_i \rightarrow s'_j$  связан с определенной операцией  $e'$ , выполняемой некоторым процессом  $P'_k$ ,  $k = 1, \dots, r'$ . Естественно будет поставить процесс в соответствие техническому средству, участвующему в реализации данного протокола. Такими техническими средствами при анализе СПД на канальном уровне могут стать мосты, а для транспортного уровня — маршрутизаторы, между которыми организуется подтверждение доставки пакета и, при необходимости, повторная передача. В этом случае под процессом  $P'$  будем понимать последовательность действий, выполняемых по программе узла коммутации, а под операцией  $e'$  — передачу соответствующего сообщения, содержащего данные обмена или служебную информацию;

переход может быть идентифицирован парой признаков ( $P'_k e' v$ ), где  $v = 1, \dots, N'$  — используемые в протоколе операции. При этом полагаем, что память на предыдущие процессы и операции отсутствует.

«Столкновения» возникают вследствие инициализации разными процессами одной и той же операции, что приводит к блокировкам в работе протокола. Данный вид прерывания нарушает формальные внешние правила построения протокола, он может быть отнесен к синтаксическим логическим ошибкам.

Рассмотрим процессы  $P'_1$  и  $P'_2$ , протекающие в оконечных узлах (объектах) протокола формирования и разъединения виртуального канала между узлами коммутации УК<sub>1</sub> и УК<sub>2</sub>. Для каждого объекта состояния  $s'_0$  — исходные, соответствующие отсутствию взаимодействия между УК<sub>1</sub> и УК<sub>2</sub>, а  $s'_1$  — включение виртуального канала. Операция  $e'$  отображает передачу ( $-e'_1$ ) и прием ( $+e'_1$ ) сообщения «ЗАПРОС ВЫЗОВА», передачу ( $-e'_2$ ) и прием ( $+e'_2$ ) сообщений «ЗАПРОС РАЗЪЕДИНЕНИЯ».

Переход  $s'_1 \rightarrow s'_0$  может инициироваться только процессом  $P'_2$ , в отношении же инициации перехода  $s'_0 \rightarrow s'_1$  оба процесса равноправны.

Предположим, что в состоянии  $s'_0$  процесс  $P'_1$  осуществляет операцию  $e'_1$  в адрес процесса  $P'_2$  и по дуге  $a_1$ , согласно идентификаторам ( $P'_1 - e'_1$ ), переходит в состояние  $P'_2$ . С другой стороны, процесс  $P'_2$  может выполнить опера-

цию  $e'_1$  в адрес процесса  $P'_1$  и перейти по дуге  $a_2$  в состояние  $s'_1$  еще до того, как ему станет известно об операции процесса  $P'_1$ . Оба процесса в состоянии  $s'_1$  получают сигнал реализации удаленным процессом операции  $e'_1$ , который в данном состоянии не регламентирован, и в результате протокол блокируется.

Для выхода из возникшей ситуации необходимо обращение к процедуре восстановления путем дополнительных затрат ресурсов протокола  $C'$  или протокола более высокого иерархического уровня. Даже при условии обмена сигналами между процессами без искажений может возникнуть прерывание вне протокола, которое есть следствие несовершенства представления протокола  $C'$ . Число таких ошибок может быть особенно большим при неформальном описании протокола, когда отсутствует, например, графическая интерпретация допустимости приема тех или иных сигналов.

Хотя в приведенной модели предметом рассмотрения является частная задача, отмеченная ситуация носит общий характер применительно к протоколам любого уровня либо структуры и иллюстрирует механизм возникновения прерываний вне протокола типа «столкновение». В более сложных транспортных протоколах СПД, где выполняется значительное число параллельных процессов ( $N' \gg 2$ ), а также имеет место разветвленная диаграмма переходов (например, в случае многоадресной доставки пакетов), столкновения могут происходить как цепочки условных событий, что затрудняет их обнаружение.

Второй тип логических событий составляют «неопределенности». Неопределенности вызываются своеобразными столкновениями различных последовательностей операций одного и того же процесса. Данный вид прерывания возникает при наличии у процесса нескольких различных последовательностей операций, ведущих к одному и тому же состоянию. Прерывания вне протокола типа «неопределенности» не входят в противоречие с формальными правилами и не блокируют процессы протокола, однако могут приводить к созданию более сложных воздействий на его функционирование.

Пусть протокол усовершенствован таким образом, что процесс  $P'_1$ , получив сигнал выполнения процессом операции  $e'_1$ , реализует



операцию  $e'_3$  (направляет сообщение «ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ЗАПРОСА» в адрес процесса  $P'_2$  и обратно). При этом достигается состояние  $s'_2$ , состояние  $s'_1$  трактуется как промежуточное, а  $s'_3$  — финальное. При выходе из  $s'_0$  вследствие осуществления операции  $e'_1$  со знаком минус возможны две ситуации, когда удаленный процесс:

еще не приступил к выполнению операции  $e'_1$  и, следовательно, в его диаграмме имеет место переход  $s'_0 \rightarrow s'_2$  по дуге  $a_3$ . Для завершения полного цикла функционирования протокола удаленный процесс должен приступить к операции —  $e'_3$ ;

ранее выполнил операцию  $e'_1$  и находится в состоянии  $s'_1$ . Тогда происходит переход  $s'_1 \rightarrow s'_3$  по дуге  $a_4$ .

Достижение финального состояния  $s'_0$  по дуге  $a_4$  в каждом из процессов возможно под воздействием операций  $e'_1$  и  $e'_3$ , осуществляемых удаленным процессом. Пусть в процессе  $P'_1$  начиная с исходного состояния  $s'_0$  последовательно имеют место операции  $-e'_1$ ,  $+e'_1$ ,  $+e'_2$ . Этой цепи отвечают две различные последовательности операций процесса  $P'_2$ , а именно:  $+e'_1$ ,  $-e'_3$ ,  $-e'_2$  и  $-e'_1$ ,  $+e'_3$ ,  $-e'_2$ . Отсюда вытекает, что процесс  $P'_1$  не располагает точной информацией

относительно истинной реализации процесса  $P'_2$ , т. е. имеет место неопределенность.

Два указанных типа прерываний вне протокола известным образом связаны с понятиями «синтаксис» и «семантика» протокола. Действительно, поскольку столкновения нарушают формальные внешние правила построения протокола, они могут быть отнесены к синтаксическим прерываниям. Что же касается неопределенностей, то они не входят в противоречие с формальными правилами и не блокируют процессы протокола, однако могут приводить к созданию более сложных действий на его функционирование. Неопределенности, как следует из рассмотренной модели, в основе своей вызываются своеобразными столкновениями различных последовательностей операций одного и того же процесса, и, кроме тщательной спецификации протоколов, требуется постоянный их анализ на предмет выявления прерываний. Особое значение эта проблема приобретает для протоколов высоких уровней, так как нечеткое определение правил протокола может привести к конфликту в обеспечении функций информационного обмена [17].

В статье на основе модели разработана методика обнаружения и коррекции прерываний



Методика обнаружения и коррекции прерываний вне протокола



вне протокола процессов информационного обмена в сетях передачи данных подразделений ГПС МЧС России.

Разработанная методика обнаружения и коррекции состоит из четырех этапов и представле-

на на рисунке. Методика позволяет в процессе эксплуатации обнаруживать прерывания вне протокола и восстанавливать процесс информационного обмена на основе информации о текущем состоянии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Башарин, Г.П.** Анализ очередей в вычислительных сетях. Теория и методы расчета [Текст] / Г.П. Башарин, П.П. Бочаров, Я.А. Коган // М.: Наука, 1989.— 336 с.
2. **Бестужин, А.Р.** Контроль и диагностирование телекоммуникационных сетей [Текст] / А.Р. Бестужин, А.Ф. Богданова, Г.В. Стогов // СПб.: Политехника, 2003.— 174 с.
3. **Вегешна, Ш.** Качество обслуживания в сетях IP [Текст] / Ш. Вегешна // М.: Издательский дом «Вильямс», 2003.— 368 с.
4. **Георгиевский, А.Е.** Моделирование процессов взаимодействия протокольных объектов в средствах информационного обмена [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук / А.Е. Георгиевский.— Орел, 2008. 184 с.
5. **Джинчарадзе, А.К.** Методические подходы и тенденции развития стандартизации и систем качества в области информационных технологий [Текст] / А.К. Джинчарадзе // Информационное общество.— 2000. № 3.— С. 37–43.
6. **Еременко, В.Т.** Концепция обнаружения и коррекции логических ошибок в реализациях профилей протоколов безопасности [Текст] / В.Т. Еременко // Телекоммуникации.— 2003. № 8.— С. 30–35.
7. **Линнингтон, П.Ф.** Принципы определения служб и спецификации протоколов [Текст] П.Ф. Линнингтон // ТИИЭР.— 1983. Т. 71, № 12.— С. 17–22.
8. **Мишин, Д.С.** Методика управления потоком данных транспортного протокола распределенной управляющей системы в режиме возобновления после сбоев [Текст] / Д.С. Мишин, А.Н. Савенков, С.В. Костин // Всеросс. научно-практ. конф. «Современные проблемы борьбы с преступностью»: Сб. (Информационная безопасность).— Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2005.— № 5.— С. 82–83.
9. **Парамохина, Т.М.** Автоматизация процессов аттестационных испытаний средств информационного обмена [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук / Т.М. Парамохина.— Орел, 2007.— 175 с.
10. **Шелухин, О.И.** Фрактальные процессы в телекоммуникациях [Текст]/О.И. Шелухин, А.М. Теняков, А.В. Осин // М.: Радиотехника, 2003.
11. **Еременко, В.Т.** Моделирование процессов анализа реализаций протоколов информационного обмена для решения задач описания их статического и динамического взаимодействия [Текст] / И.С. Константинов, В.Т. Еременко // Вестник компьютерных и информационных технологий.— 2004. № 4.— С. 11–15.
12. **Еременко, В.Т.** Теоретические основы обслуживания сообщений в информационно-телекоммуникационных системах [Текст]: Учебное пособие / В.Т. Еременко, О.Г. Кузьменко, Н.Г. Подчерняев.— Орел: Изд-во Орловского юридического института, 1999.— 118 с.
13. **Савенков, А.Н.** Методика обнаружения и предотвращения блокировок процессов информационного обмена с использованием маркированных потоковых графов [Текст] / А.Н. Савенков // «Информационные технологии в науке, образовании и производстве»: Матер. междунар. научно-техн. конф.— Орел: Изд-во ОрелГТУ, 2006.— Т. 1— С. 188–191.
14. Еременко, В.Т. Проблемы функциональной стандартизации протоколов информационного обмена в распределенных управляющих системах [Текст]. / В.Т. Еременко // Известия Орловского государственного технического университета. Серия «Информационные системы и технологии».— 2005. № 1.— С. 3—7.
15. **Давыдов, Е.Б.** Тенденции процессов разработки и исследования протоколов сетей связи [Текст] / Е.Б. Давыдов, Ю.С. Злотников // Техника средств связи. Сер.: ТПС.— 1987. Вып. 2.— С. 79–88.
16. **Еременко, В.Т.** Алгоритмы поиска угроз в пространстве состояний процессов информационного обмена распределенной управляющей системы [Текст] / И.С. Константинов, В.Т. Еременко // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2004. Т. 10. № 4А.— С. 912–918.
17. **Савенков, А.Н.** Управление процессами информационного обмена в сетях передачи данных АСУ машиностроительного предприятия [Текст]: Дисс. ... канд. техн. наук / А.Н. Савенков.— Орел, 2007.— 144 с.



## РАЗРУШЕНИЕ БЕТОННЫХ ПЛОТИН НА МЯГКОМ ОСНОВАНИИ. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ПРОРАНА В ОСНОВАНИИ МНОГОСЕКЦИОННЫХ ПЛОТИН

Плотина — это гидротехническое сооружение, перегораживающее реку для подъема уровня воды перед ним и создания водохранилища.

Мировой опыт насчитывает более 300 разрушений плотин гидроузлов за последнее столетие в мирное время, из них — несколько в России. Последнее катастрофическое событие — разрушение в 1993 году сравнительно небольшой Киселевской плотины (Свердловская область), которое унесло 15 человеческих жизней и причинило убыток в 40 млрд. руб.

При разрушении плотины основной ущерб причиняет волна прорыва (рис. 1). Основные параметры волны прорыва, определяющие ее поражающее действие, — высота, скорость и длительность затопления — непосредственно зависят от процесса разрушения плотины. Следовательно, для оценки ущерба от последствий распространения волны прорыва необходима разработка физико-математической модели процесса разрушения плотин.

Основными факторами, влияющими на разрушение бетонных плотин на основании из местных материалов (мягкое основание), являются [1–4]:

перелив воды через гребень (при опасных природных процессах и техногенных катастрофах);

размыв основания плотины вихревым течением.

Известно, что разрушение бетонных плотин данного типа происходит в две стадии [1]:

образование начального *прорана* — бреши в основании плотины (например, вследствие терактов, землетрясений или в результате старения основания и стен плотины);

развитие прорана из-за размыва в основании придонным вихревым течением.

Математическую модель разрушения бетонных плотин на основании из местных материалов [1, 5] после ряда приближений для практических расчетов можно записать в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) 1-го порядка:

$$\begin{cases} \frac{dH}{dt} = -\frac{Cd}{2} \sqrt{g} \frac{H_0^2}{V_0} BH^{\frac{1}{2}}, & H(0) = H_0; \\ \frac{dB}{dt} = \alpha \sqrt{g} \frac{A}{\bar{H}^{\frac{1}{3}}} H^{\frac{1}{2}}, & B(0) = B_0. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $H = H(t)$  — глубина воды в водохранилище перед плотиной;  $B = B(t)$  — ширина критической (наиболее узкой) секции прорана;  $\alpha$  и  $C_d$  — известные численные коэффициенты;  $g$  — ускорение свободного падения;  $H_0$ ,  $V_0$  — начальные глубина и объем воды в водохранилище;  $B_0$  — величина начального прорана;  $\bar{H}$  — средняя глубина в водохранилище за время

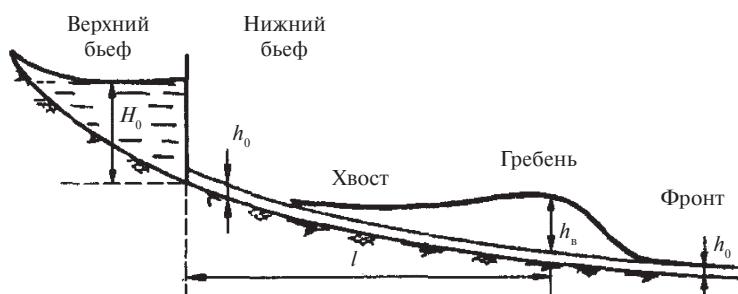
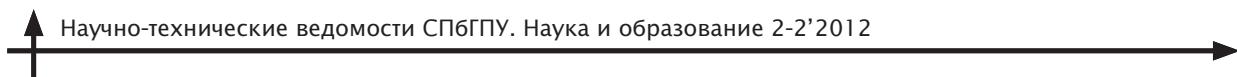


Рис. 1. Волна прорыва в нижнем бьефе



мя развития прорана;  $A$  — константа, зависящая от характеристик грунта и параметров потока.

В процессе разрушения бетонных плотин *на скальном основании* главенствующую роль играют фильтрационные процессы и развитие трещин вследствие фильтрации воды в тело плотины [3, 4], что требует построения других математических моделей, в частности позволяющих определить начальный проран, учитывающих коэффициент устойчивости плотины, что выходит за рамки данной работы.

Задачей настоящей работы было интегрирование системы (1) для моделирования разрушения бетонных плотин *на основании из местных материалов*, а также проведение аналогичных расчетов применительно к разрушению многосекционных бетонных плотин на основании из местных материалов.

Интегрирование системы (1) требует постановки начальных условий для решения задачи Коши. В данной работе будем предполагать, что начальный проран  $B_0$  известен и задан. Как правило, начальный проран образуется при потере устойчивости и последующем выносе в нижний бьеф одной или нескольких секций плотины.

Будем решать систему уравнений (1) при следующих исходных данных, приближенных к реальным:

$$H_0 = 60 \text{ м}; B_0 = 30 \text{ м}; C_d = 0,5; g = 9,81 \text{ м/с}^2;$$

$$V_0 = 10^{10} \text{ м}^3; \alpha = 0,05; A = 0,3^3 \cdot 0,057;$$

$$\bar{H} = \frac{H_0}{2}. \quad (2)$$

Будем считать, что длина плотины по гребню равна 1000 м.

Для данной системы может быть получено точное аналитическое решение, имеющее несложную форму записи. Численное решение системы получим, используя метод Рунге — Кутты — Фельберга — явную одн шаговую схему, 4- или 5-этапный метод с адаптивным выбором шага интегрирования, имеющийся в арсенале методов интегрирования программного пакета Maplesoft Maple 14 [6]. Соответствующий текст программы следующий:

```
> Cd := 0.5: g := 9.81: V0 := 10^10: H0 := 60: H1 := (H0/2)^(1/3): alpha := 0.05: A := 0.3^3*0.057:
```

$$\begin{aligned} sys1 := \frac{d}{dt} b(t) = \frac{\text{alpha} \cdot \sqrt{g} \cdot A}{H1} \cdot \sqrt{h(t)}, \frac{d}{dt} h(t) = -\frac{Cd}{2} \\ \cdot \frac{\sqrt{g} \cdot H0^2}{V0} \cdot b(t) \cdot \sqrt{h(t)}; \end{aligned}$$

$$Y := \text{dsolve}(\{sys1, h(0) = 60, b(0) = 30\}, \text{fcns}, \text{type} = \text{numeric}, \text{range} = 0..450000);$$

Графики изменения во времени величин  $H(t)$  и  $B(t)$  приведены на рис 2.

Целью излагаемой работы было также алгоритмизировать решение задачи о разрушении многосекционных плотин из местных материалов и выработать подход к получению решений системы (1) при расчете разрушения многосекционных бетонных плотин. Проблема заключается в том, что при «подмытии» основания секции течение выносит эту секцию в нижний бьеф, что порождает кусочно-непрерывные решения относительно величины прорана  $B(t)$ . Приходится решать не одну систему ОДУ, а для каждой секции плотины — свою систему дифференциальных уравнений, при этом «склеивать» решения, полученные на стыках секций плотины.

Процесс интегрирования систем ОДУ для многосекционной плотины можно существенно упростить, сведя их к интегрированию по прежнему одной системы за счет введения «особых» условий на эту систему — событий при численном интегрировании системы — и определенных алгоритмических действий при достижении этих условий.

Производная величины  $B(t)$  выражается явно, входит только в левую часть системы уравнений. Для учета разрывов функции  $B(t)$  (при скачкообразных увеличениях ширины прорана при потере устойчивости секций плотины) второе уравнение в (1) для удобства перехода к дискретным методам заменим интегральным соотношением  $B(t) = B_0 + \int_0^t \alpha \sqrt{g} \frac{A}{\bar{H}^{1/3}} H(t)^{1/2} dt$ .

Таким образом, получим нелинейную систему интегро-дифференциальных уравнений:

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{Cd}{2} \sqrt{g} \frac{H_0^2}{V_0} B H^{1/2}, \quad H(0) = H_0,$$

$$B(t) = B_0 + \int_0^t \alpha \sqrt{g} \frac{A}{\bar{H}^{1/3}} H(t)^{1/2} dt. \quad (3)$$

Напомним: для существования и единственности решения достаточно выполнения условия



Липшица для вектор-функции правых частей [7]. Формальная запись 2-го уравнения системы (3) в интегральном виде позволяет нам переопределить функцию  $B(t)$  в конечном числе точек.

При интегрировании системы численно по явной одношаговой схеме (например, методом Рунге — Кутты) промежуток  $[0; t]$  делится на малые интервалы, в каждом из которых значения производной искомой вектор-функции аппроксимируются линейной комбинацией численных значений вектор-функции правых частей в этом интервале.

Здесь:  $0 = t_0 < \dots < t_{i-1} < t_i$ ; отрезок  $[t_{i-1}; t_i]$  — участок интегрирования системы (4), а  $t'_i$  — «особые» точки, в которых мы задаем разрывы функции  $B(t)$ ;  $i = \overline{1, n}$ .

Зададим разрывы  $B(t)$  при скачкообразных увеличениях ширины прорана при потере устойчивости секций плотины. Для этого переопределим функцию  $B(t)$  в точках  $t'_i$ , т. е. принудительно присвоим функции  $B(t)$  значения  $B_i$  в точках  $t'_i$ . Для единобразия можно считать, что на каждом участке численного интегрирования  $[t_{i-1}; t_i]$  у функции  $B(t)$  имеется особенность в точке  $t'_i \in (t_{i-1}; t_i]$ . Обоснуем возможность применения явной одношаговой схемы интегрирования при правой части, заданной подобным образом. В этом случае правая часть системы (1), в частности производная  $B'(t)$ , будет не определена в точках  $t'_i$ , однако функция  $B'(t)$  будет сохранять «липшицевость» всюду на участке интегрирования, за исключением конечного числа особых точек. Итак, запишем:

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{Cd}{2} \sqrt{g} \frac{H_0^2}{V_0} BH^{\frac{1}{2}}, \quad H(0) = H_0;$$

$$B(t) =$$

$$= \begin{cases} B(t_{i-1}) + \int_{t_{i-1}}^{t_i} \alpha \sqrt{g} \frac{A}{H^{\frac{1}{3}}} H(t)^{\frac{1}{2}} dt, & t_{i-1} \leq t < t'_i \leq t_i; \\ B_i, & t'_i \leq t \leq t_i. \end{cases} \quad (4)$$

Если задавать особенность (скакок) функции  $B(t)$  лишь на границе участка интегрирования, т. е. при  $t'_i = t_i$ , то аппроксимация производных внутри участка (шага) интегрирования по одношаговой явной схеме «не пострадает» —

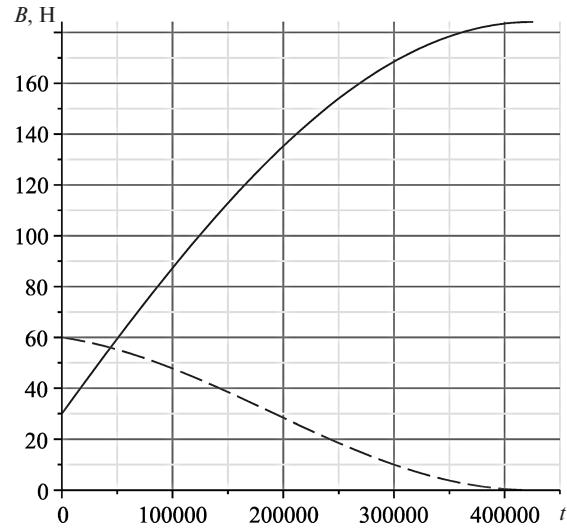


Рис. 2. Графики изменения ширины прорана  $B(t)$  (—) и высоты уровня водохранилища  $H(t)$  (— —)

в случае «бесконечной» производной приближение производной не будет «ходить» на бесконечность. Таким образом, сохраняется выполнение условия Липшица для правой части системы на каждом участке интегрирования, а дискретная схема интегрирования применима в неизменном виде для системы (4) с уравнением, записанным в интегральной форме с переопределеными значениями функции  $B(t)$ . В результате, допустимо продолжить интегрирование, искусственно преодолев особенности правой части в точках  $t_i$ .

Поскольку производная  $dB/dt$  в условиях (4) не существует в точках  $t_i$ , очевидно, что  $dH/dt$  терпит разрыв в точках  $t_i$ , как и  $B(t)$ , однако  $H(t)$  является непрерывной функцией.

Получим численное решение системы (4) с учетом построенного алгоритма изменения значений  $B$  в особых точках путем интегрирования системы дискретным методом. Будем считать, что все секции плотины имеют одинаковую ширину и разрушаются последовательно в обе стороны вдоль гребня плотины симметрично относительно центральной секции. Для определенности будем также считать, что секция плотины разрушается полностью (то есть секция теряет устойчивость и выносится потоком воды) при размытии основания данной секции на  $1/3$  площади секции бетонной плотины, что соответствует экспериментальным данным.



Запишем подробно алгоритм построения особых условий для численного интегрирования системы интегро-дифференциальных уравнений (4), реализованный авторами на языке программирования пакета Maple [6, 7]:

```
> numsects := 33 : seclen := 30 : evts := [ ]:
broklen := seclen :
for i from 1 to  $\frac{\text{numsects} - 1}{2}$  do
  evts :=  $\left[ \text{op}(\text{evts}), \left[ b(t) - \text{eval}\left(broklen + \frac{2}{3} \cdot \text{seclen}\right), b(t) \right. \right.$ 
   $\left. \left. = \text{eval}(\text{broklen} + 2 \cdot \text{seclen}) \right] \right] :$ 
  broklen := broklen + 2 · seclen :
end do:
```

Здесь  $\text{numsects} = 33$  — число секций многосекционной плотины,  $\text{seclen} = 30$  м — длина каждой секции.

Численное решение системы ОДУ получим вышеуказанным методом Рунге — Кутты — Фельберга с учетом событий, меняющих нормальный ход дискретного метода интегрирования при достижении особых условий:

```
> Y := dsolve( {sys1, h(0) = 60, b(0) = 30}, fcn, type = numeric, events
  = evts);
```

Графики величин  $B(t)$  и  $H(t)$  для многосекционной плотины приведены на рис. 3.

Для аналитического решения системы в случае многосекционных плотин уже не построить достаточно простого выражения, поскольку на-

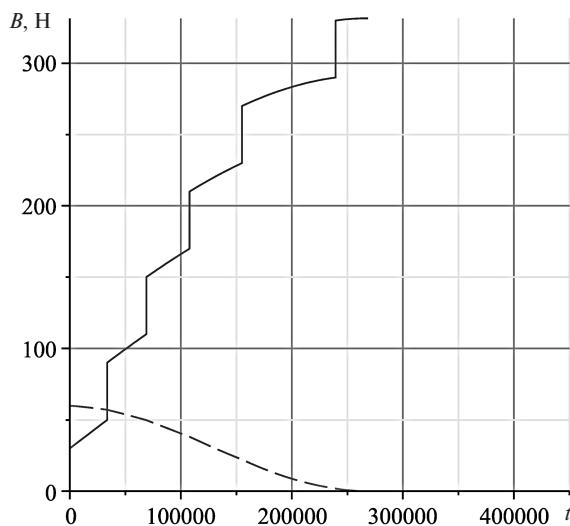


Рис. 3. Графики ширины прорана  $B(t)$  (—) и высоты уровня водохранилища  $H(t)$  (— —) для многосекционной бетонной плотины

чальные условия — начальные значения  $B(t)$  и  $H(t)$  — на последующих участках интегрирования вычисляются на основе конечных значений на предыдущих участках интегрирования.

Практическую ценность представляет мониторинг ширины прорана многосекционной бетонной плотины в полных секциях плотины, когда наблюдения ведутся не за  $B(t)$ , а за кусочно-постоянной функцией  $B_{(1)}(t)$  — суммарным прораном разрушенных секций, который увеличивается только тогда, когда очередная секция плотины смыывается течением целиком. Для этого удобно ввести 3-ю (фиктивную) переменную интегрирования  $B_{(1)}$ , записать для нее дифференциальное уравнение и сформулировать особые условия при численном интегрировании:

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{Cd}{2} \sqrt{g} \frac{H_0^2}{V_0} BH^{\frac{1}{2}}, \quad H(0) = H_0;$$

$$\frac{dB_{(1)}}{dt} = 0, \quad B_{(1)}(t) = \begin{cases} B(t_{i-1}), & t_{i-1} \leq t < t_i; \\ B(t_i), & t = t_i; \end{cases}$$

$$B(t) = \begin{cases} B(t_{i-1}) + \int_{t_{i-1}}^t \alpha \sqrt{g} \frac{A}{\bar{H}^{\frac{1}{3}}} H(t)^{\frac{1}{2}} dt, & t_{i-1} \leq t < t_i, \\ B_i, & t = t_i. \end{cases} \quad (5)$$

Совмещенные графики трех величин —  $B_{(1)}(t)$ ,  $B(t)$  и  $H(t)$ , полученные при интегрировании системы (5) для многосекционной плотины, приведены на рис. 4.

Численное решение задачи разрушения многосекционной бетонной плотины на основании из местных материалов позволяет убедиться в том, что:

1) наличие секций в структуре бетонной плотины на основании из местных материалов приводит к «эскалации» развития прорана, поскольку разрушение плотины нарастает скачкообразно, вплоть до полного слива воды из водохранилища;

2) многосекционная плотина при развитии прорана пострадает значительно меньше односекционной плотины той же ширины (длины вдоль гребня), в частности в силу того, что смыв секций целиком при частичном размыве основания будет ускорять истечение воды из водохранилища;

3) полный слив воды из водохранилища (как для односекционной, так и для многосекционной плотины) ведет к достижению точки «син-



гулярности» решения  $\left(\frac{dB}{dt} = 0, H = 0\right)$ , «правее» которой численное решение системы ОДУ отсутствует, т. е. в конечной точке интегрирования существует только односторонняя (левая) производная  $B'(t) = 0$ , о чём своевременно сигнализирует программный пакет Maple.

Построенная физико-математическая модель на основе систем интегро-дифференциальных уравнений (3)–(5) развития прорана многосекционной плотины с основанием из местных материалов, безусловно, уточняет описание механизма разрушения бетонных плотин, приводит к кусочно-непрерывным решениям, которые получены в нашей работе численно. Авторы рассчитывают на развитие данного исследования, предполагающее постановку ряда коммерческих задач, что позволит провести натурные эксперименты для адекватной параметризации модели.

Разработка численного алгоритма, применимого для моделирования процесса разрушения плотин, — задача, актуальная для оценки ущерба от последствий распространения волны прорыва, что послужит объектом дальнейших исследований авторов.

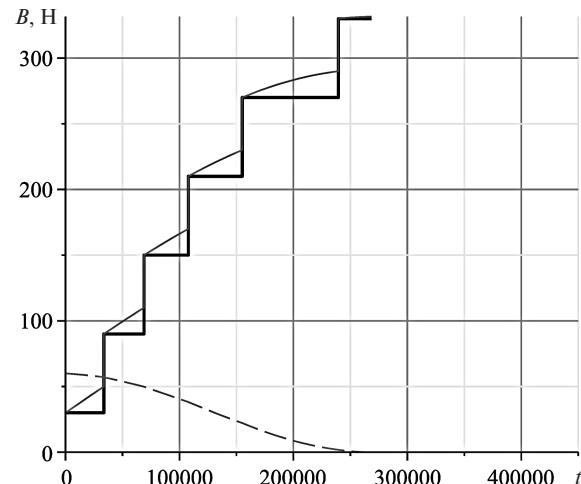


Рис. 4. Графики ширины прорана  $B_{(1)}(t)$  (—) в полных секциях, ширины прорана  $B(t)$  (—) и высоты уровня водохранилища  $H(t)$  (— · —) для многосекционной бетонной плотины

Научно обоснованный заблаговременный прогноз последствий разрушения плотин необходим для разработки и принятия мер для защиты от возможных последствий или для максимально возможного уменьшения ущерба.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розов, А.Л. Действие ядерного взрыва на гидроузел и последствия его разрушения. Физика ядерного взрыва. Т.2 Действие ядерного взрыва [Текст] / А.Л. Розов // М.: Наука, Физматгиз, 1997.— С. 67–78.
2. Rozov, A.L. Modeling of washout of dams [Текст] / A.L. Rozov // Journal of Hydraulic Research.— 2003. Vol. 41. Issue 6.— P. 565–577.
3. Гришин, М.М. Гидротехнические сооружения [Текст] / М.М. Гришин // М.: Энергия, 1968.
4. Малик, Л.К. Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений [Текст] / Л.К. Малик //
- Проблемы безопасности.— М: Наука, 2005.
5. Лаврентьев, М.А. Проблемы гидродинамики и их математические модели [Текст] / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат // М.: Наука, 1973.— 416 с.
6. Дьяконов, В.П. Математическая система Maple VR3/R4/R5 [Текст] / В.П. Дьяконов // М.: СОЛОН Пресс, 1998.— 400 с.
7. Холл, Дж. Современные численные методы решения дифференциальных уравнений [Текст] / Дж. Холл, Дж. Уатт.— М.: Мир, 1976.

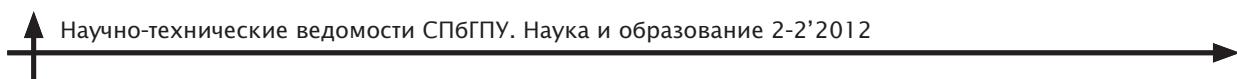
УДК 621.039.566

В.И. Гуменюк, М.Е. Федосовский, А.А. Сыров, Г.Л. Атоян

## ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Системы управления (СУ) представляют собой упорядоченный набор средств сбора сведений о подконтрольном объекте и средств воз-

действия на его поведение с целью достижения определенных целей. В качестве объектов управления будем рассматривать опасные производ-



ственныe объекты (ОПО) и критически важные объекты (КВО).

Системы управления наряду с системами диагностики могут быть подсистемами объектов технического регулирования (ОРТ) опасных производственных объектов и критически важных объектов, поэтому их защиту можно рассматривать как элемент общей защиты объектов. Нарушение работоспособности СУ, особенно при развитии аварийных ситуаций и в условиях воздействия поражающих факторов, ведет к эскалации аварий и увеличению тяжести последствий по мере перехода от ОРТ к КВО.

Для адекватности защиты СУ КВО от предполагаемых угроз необходимо провести категорирование объектов. Например, можно разделить ОРТ, ОПО и КВО на две большие группы: функциональной опасности и функциональной значимости. Кроме того, можно их разделить на объекты государственного значения, регионального значения, особого значения и гражданско-го значения.

Сложнее установить требования к системе защиты СУ в соответствии с уровнем (категорией) объекта. Уровни системы защиты СУ должны соответствовать минимально необходимым требованиям к обеспечению безопасности для функционально опасных и функционально значимых объектов в соответствии с их категориями.

Минимальный состав системы защиты, соответствующий категории объекта, должен определяться исходя из функций, выполняемых данными системами и средствами. На основании перечня минимально необходимых требований, принятых для объектов разных категорий, должны устанавливаться конкретные требования при проектировании систем защиты СУ КВО с учетом их отраслевой принадлежности и класса защиты.

Для определения подхода к рассмотрению вопросов защищенности СУ на опасных объектах целесообразна изначальная классификация последствий возможных на них чрезвычайных ситуаций (ЧС).

Возможна укрупненная классификация, использующая следующие категории:

последствия глобального характера (для КВО), в первую очередь на объектах ядерного комплекса, характеризующиеся возможными

взрывами, пожарами, заражением местности и иными негативными факторами для целых регионов страны либо нескольких стран;

последствия регионального масштаба — пожары, взрывы на объектах (для ОПО), приведшие к разрушениям, жертвам меньшего масштаба;

последствия местного масштаба на объектах (для ОРТ).

В основе концепции безопасности должна лежать система или методика анализа набора угроз (см., например, [17, 19]). Все меры защиты должны базироваться на результатах данного анализа. Построение эффективного комплекса защитных мер возможно только относительно определенного, характерного набора угроз [1].

При рассмотрении вопросов, связанных с созданием системы защиты ДС КВО, необходимо учитывать следующие аспекты безопасности при штатной эксплуатации: безопасность излучений; биологическую; взрывобезопасность; механическую; пожарную; промышленную; термическую; химическую; электрическую.

Кроме того, комплекс защитных мер должен обеспечивать защиту диагностических систем КВО от поражающих факторов аварий и катастроф.

К СУ применимы основные принципы обеспечения безопасности потенциально опасных и критически важных объектов.

**Принцип эшелонированной защиты** предполагает создание ряда последовательных уровней защиты, включая:

установление последовательных физических барьеров начиная с защитных оболочек и кончая защищенными пространствами (специальными укрытиями) на пути распространения энергии, вещества поражающих факторов в направлении СУ или для устранения контакта с опасными элементами объекта;

разработку технических и административных мероприятий по сохранению целостности и эффективности этих барьеров.

Для воспрепятствования воздействию внешних факторов широко используется «барьерная» концепция, основанная на использовании принципа множественности барьеров (рубежей) и эшелонированной защиты. Физические барьеры устанавливаются на пути возможных внешних воздействий на защищаемый объект (рис. 1) [2].



Можно оценить влияние барьеров защиты на безопасность защищаемой системы [3], предполагая, что:

- 1) барьеры функционируют в нагруженном режиме, их общее число равно  $n$ ;
- 2) барьеры разрушаются (отказывают) независимо друг от друга;
- 3) вероятность разрушения (отказа)  $i$ -го барьера равна  $q_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) и не зависит от срока эксплуатации барьера;
- 4) поражение наступает в случае, когда откажут все барьеры безопасности.

Рассматривая совокупность барьеров как резервированную систему с невосстанавливаемыми элементами (барьерами), можно рассчитать вероятность безотказной работы  $P$  совокупности из  $n$  барьеров:

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i), \quad (1)$$

С ростом числа барьеров  $n$  и/или уменьшением вероятности разрушения барьера  $q_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) вероятность безотказной работы совокупности барьеров увеличивается, т. е. снижается вероятность поражения.

Выражение (1) дает оценку  $P$  снизу, так как при расчете предполагается, что режим работы каждого из барьеров максимально нагруженный. Для равнодежных барьеров справедлива формула

$$n \geq \ln(1 - P) / \ln q, \quad (2)$$

которая следует из (1) и позволяет оценить потребное число барьеров безопасности из условия обеспечения заданной вероятности  $P$ .

Принцип эшелонированной защиты позволяет создать препятствия неуправляемым потокам энергии или опасных веществ прежде, чем может быть нанесен ущерб ( $U$ ) защищаемой системе управления, и снижает вероятность того, что единичные отказы технических средств или ошибка персонала приведут к опасным последствиям. В случае множественных отказов технических средств и/или ошибок персонала применение этого принципа снижает вероятность опасных последствий.

**Системный подход** к защите СУ предполагает необходимость учета всех взаимосвязанных, взаимодействующих и изменяющихся во времени элементов, условий и факторов, существенно

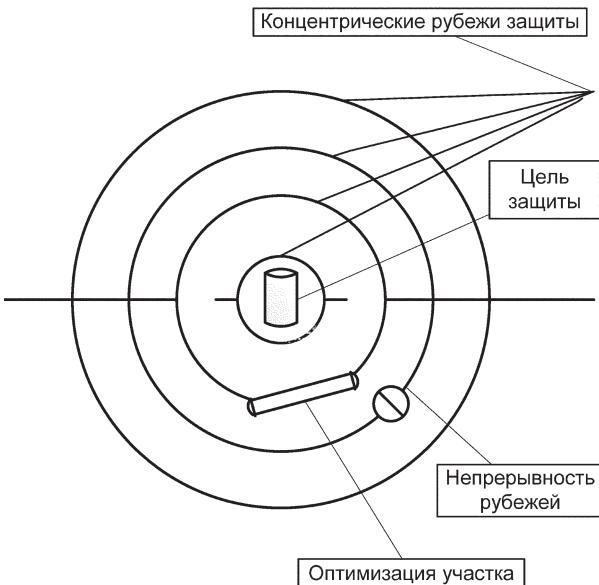


Рис. 1. Принцип эшелонированной защиты (концентрическое построение рубежей вокруг целей защиты)

значимых для понимания и решения проблемы обеспечения безопасности ДС.

**Принцип комплексности** (применение различных видов защиты) означает, что при построении системы защиты необходимо учитывать все угрозы, а выбранные средства и методы защиты должны функционально и технически взаимно дополнять друг друга.

Защита ДС КВО должна представлять собой **непрерывный процесс**, предполагающий принятие соответствующих мер на всех этапах жизненного цикла ОТР, ОПО и КВО начиная со стадии проектирования и кончая эксплуатацией. Разработка системы защиты должна вестись параллельно с разработкой самой защищаемой системы.

Все участки всех защитных уровней должны быть **равноустойчивыми** к поражающим факторам с точки зрения вероятности реализации угрозы [1, 4].

В соответствии с **принципом единичного отказа** система управления должна выполнять свои функции при любом исходном событии и при независимом от исходного события отказе любого ее элемента. Реализация принципа единичного отказа обеспечивает работу системы управления в случае возникновения единичного отказа ее элемента или ошибки персонала.



На практике принцип единичного отказа можно реализовать путем резервирования элементов (рис. 2) — использования дополнительных элементов, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функций [3, 5–7].

Цель резервирования — сохранить работоспособность системы в случае возникновения отказа одного из ее элементов. В большинстве случаев применение резервирования себя оправдывает, так как увеличение стоимости за счет введения дополнительных элементов компенсируется получающимся при этом повышением надежности системы и снижением риска  $R$ .

Эффективность резервирования может снижаться из-за отказов резервируемых элементов по общей причине. Отказ по общей причине возникает под воздействием общего для резервируемых элементов фактора — внутреннего, вызванного общими конструктивными, технологическими и т. п. причинами, или внешнего, формируемого под воздействием природных явлений и/или деятельности человека — землетрясений, пожаров, взрывов, действий террористов и т. п. Для уменьшения вероятности отказов по общей причине резервированных систем или их каналов дополнительно применяются: физическое разделение, разнотипность применяемых систем и оборудования.

Уровень защищенности СУ во многом зависит от **надежности и живучести** составляющих их элементов. Для повышения надежности применяют: упрощение систем; выбор наиболее надежных элементов; создание схем с ограниченными последствиями отказов элементов; облегчение электрических, механических, тепловых и других режимов работы элементов; стандартизацию и унификацию элементов и узлов; встроенный контроль; автоматизацию проверок.

Создание эффективной защиты СУ КВО требует **комплексного научно-технического подхода**, подразумевающего разработку путей и методов решения основных задач по обеспечению безопасности СУ КВО на основе определения объектов защиты, определения и оценки угроз, а также разработки и реализации адекватных мер защиты.

**Анализ уязвимостей и угроз, алгоритм построения защиты системы управления.** Эффективность защиты СУ КВО характеризуется вероятностью обеспечения защиты от угроз, снижением уязвимости и повышением живучести СУ при воздействии поражающих факторов. Организация защиты предполагает идентификацию возможных источников угроз и факторов, способствующих их проявлению (уязвимости). Исходя из этого классификацию источников угроз и их

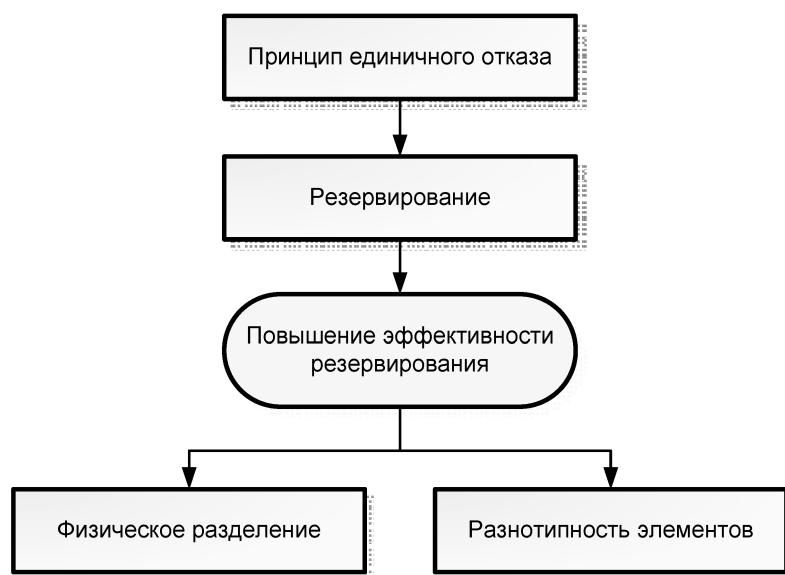


Рис. 2. Реализация принципа единичного отказа [3]



Рис. 3. Логическая цепочка угроз и их проявлений

проявлений целесообразно проводить на основе анализа логической цепочки (рис. 3).

В рассматриваемом случае источниками угроз являются техногенные и природные ЧС и несанкционированные воздействия.

Определение уязвимых мест может быть проведено на этапе анализа при помощи различных методов, например методом перечисления (составление перечня уязвимых мест), методом составления логических схем, позволяющих определить уязвимые места (группу уязвимых мест) [8–11].

Целями и задачами проведения анализа уязвимости являются:

определение важных для функционирования системы элементов и подсистем, требующих защиты с установлением их приоритетности;

определение возможных угроз, ранжированных по степени опасности, и механизмов их вероятных реализаций;

оценка характера и размера возможного ущерба для СУ и КВО в целом от реализации прогнозируемых угроз безопасности с учетом категории объекта;

оценка защищенности СУ с учетом категории объекта, выраженная в количественных (временных и вероятностных) показателях систем защиты;

оценка уязвимостей СУ и определение мер по достижению заданного уровня защищенности.

Как правило, работы по первым трем пунктам проводят методом экспертных оценок. Работы по двум последним пунктам проводятся с применением методов математического моделирования [12].

Уязвимости можно разделить на классы по принадлежности к источнику уязвимостей, а классы — на группы и подгруппы по проявлениям (рис. 4).

Показателями уязвимости системы и ее особенно важных зон служат степень уязвимости в порядковой шкале оценок или вероятность успешной реализации поражающего воздействия  $P_v$  в вероятностной шкале. Суммарная вероятность реализации уязвимости может быть определена, например, по формуле

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i), \quad (3)$$

где  $P$  — вероятность реализации уязвимости;  $p_i$  — вероятность возникновения событий, из которых складывается вероятность реализации уязвимости.

Подобный анализ дает оценку эффективности системы защиты после реализации соответствующих мер.

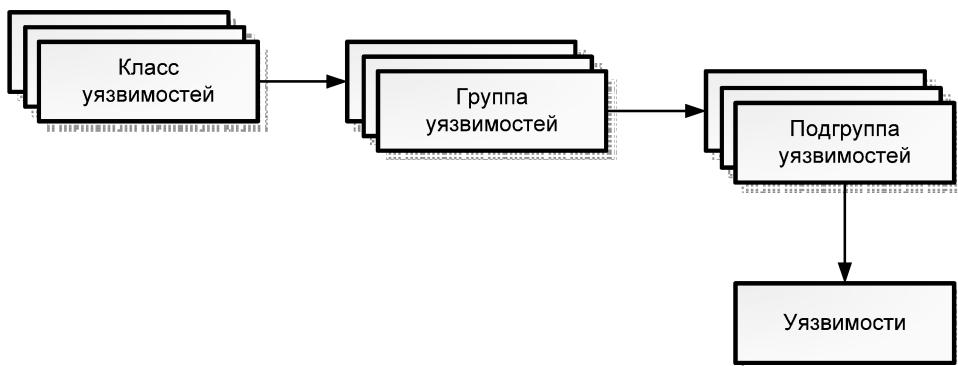


Рис. 4. Структура классификации уязвимостей



В результате анализа уязвимости должны быть получены:

перечень (набор) угроз, ранжированный по степени опасности;

характер и размер возможного ущерба и повреждений;

перечень целей защиты с определением их приоритетности;

категории элементов системы с учетом уровня потенциальных повреждений;

критерий защищенности, определяемый категорией элементов системы и выраженный в количественных (временных и вероятностных) показателях [16, 18];

перечень уязвимых мест системы управления и перечень мер по достижению заданного уровня защищенности.

На основании результатов анализа уязвимости предлагаются адекватные угрозам меры по обеспечению заданного критерия защищенности СУ. Меры по достижению требуемого уровня защищенности определяют требования к системе защиты (физической, функциональной и охранной). Сформулированные таким образом требования позволяют установить оптимальный (с функциональной и экономической точек зрения) состав системы защиты в целом и всех ее подсистем.

Меры по защите представляют собой совокупность инженерно-технических решений и организационных мер, направленных на защиту систем управления от предполагаемых угроз. Оценку уязвимости можно производить в два этапа [12].

На первом этапе методом экспертных оценок производится оценка уязвимости комплекса инженерно-технических решений и комплекса организационных мероприятий по повышению безопасности.

На следующем этапе производится количественная оценка уязвимости существующей защиты. В качестве основного показателя эффективности защиты СУ КВО используется вероятность сохранения работоспособности.

Основными угрозами безопасности, которые могут привести к утрате ресурсов СУ КВО, являются поражающие факторы чрезвычайных ситуаций: воздействия осколков и ударных волн при взрывах; воздействие механических нагрузок при обрушении зданий; тепловые воздействия при пожарах; радиационные воздействия; химические воздействия агрессивных сред; воздействия электромагнитных импульсов (ЭМИ); воздействие воды при затоплении или тушении пожаров.

Угрозу представляют также несанкционированные действия физических лиц: террористов, преступников, экстремистов.

На этапе анализа угроз при предварительном обследовании СУ КВО формируется модель вероятных механизмов реализации угроз.

Все источники угроз можно разделить на классы, обусловленные типом носителя, а классы — на группы по источникам угроз (рис. 5).

При построении модели необходимо учитывать, что угрозы безопасности носят вероятностный характер и имеют высокую степень априорной неопределенности.

При оценке угроз безопасности используются:

теория надежности для описания угроз, создаваемых техническими средствами (сбои, отказы, ошибки и т. д.);

математическая статистика для описания естественных угроз (природные явления, стихийные бедствия и т. д.);

теория вероятности для описания угроз, создаваемых людьми (по небрежности, халатности и т. д.);

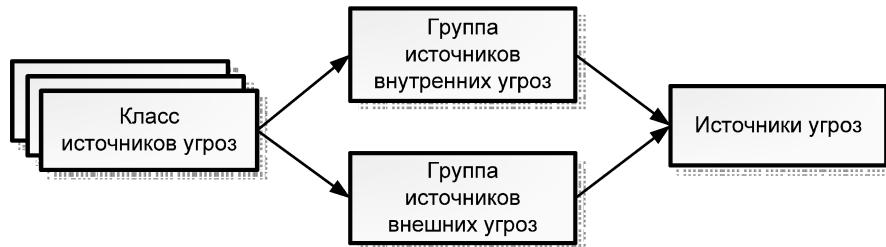


Рис. 5. Структура классификации источников угроз



экспертные методы для описания умышленных угроз.

Выявленные угрозы формируют цели защиты.

Оценка возможного ущерба от реализации прогнозируемых угроз безопасности производится методом экспертных оценок. Оценка производится для каждого защищаемого подобъекта и подсистемы СУ КВО. При этом учитываются различные сценарии реализации прогнозируемых событий.

Элементы систем управления (рис. 6) должны быть надежно защищены от прогнозируемых угроз безопасности.

Наиболее уязвимым звеном систем управления являются первичные преобразователи (датчики). Основная причина — их постоянное нахождение в опасных технологических зонах КВО, характеризующихся высокими температурами, ионизирующими излучениями, наличием химически- и взрывоопасных веществ и т. п.

Поэтому в случае возникновения аварийных ситуаций с выделением опасных потоков вещества и энергии они подвергаются наибольшим воздействиям и могут быстро выходить из строя. Их защита представляет собой серьезную проблему.

Целесообразно, чтобы проектирование защиты СУ имело две стадии [13]: концептуальное (системное) проектирование и рабочее проектирование.

В процессе концептуального проектирования разрабатываются варианты разных аспектов: построения защиты; защиты конкретных зон и подсистем, обоснование выбора методов и средств; защиты информации; организацион-

ных защитных мероприятий; сметной стоимости предлагаемых проектов защиты и оценки их эффективности, основанной на количественном или качественном определении способности системы противодействовать угрозам, выявленным на этапе анализа уязвимости.

Возможная блок-схема разработки мер защиты с применением предложенного метода анализа показана на рис. 7.

Результаты концептуального проектирования используются в качестве исходных данных для рабочего проектирования защиты СУ КВО.

В общем случае может быть предложен следующий алгоритм построения защиты СУ КВО (рис. 8).

Эффективность мероприятий защиты определяется:

наличием и состоянием технических систем контроля и защиты от аварий;

видом защит;

эшелонированием всех видов защит и технических средств обеспечения безопасности СУ КВО.

Наиболее общим критерием, характеризующим эффективность мероприятий по защите СУ КВО от угроз ЧС, является вероятность сохранения этими системами работоспособности во время ЧС. Определение количественных показателей данного критерия требует использования типовых моделей воздействий, моделей защиты как самого объекта, так и его систем управления. В большинстве случаев эта задача трудноразрешима, поэтому в качестве критерия при грубых оценках можно использовать показатель степени оснащения оборудования СУ КВО средствами защиты.

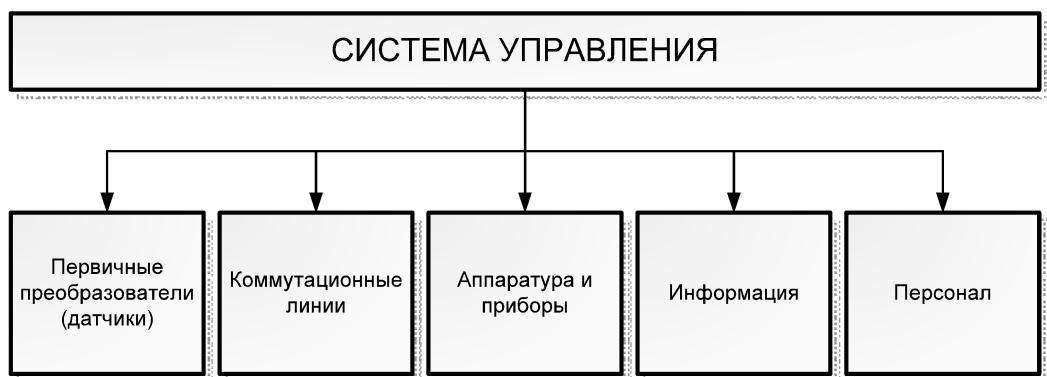


Рис. 6. Структура системы управления

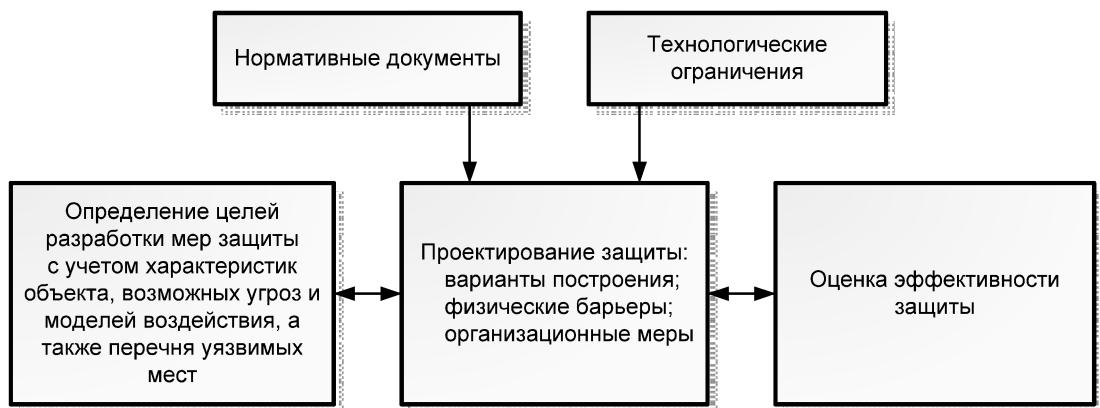


Рис. 7. Блок-схема процесса концептуального проектирования

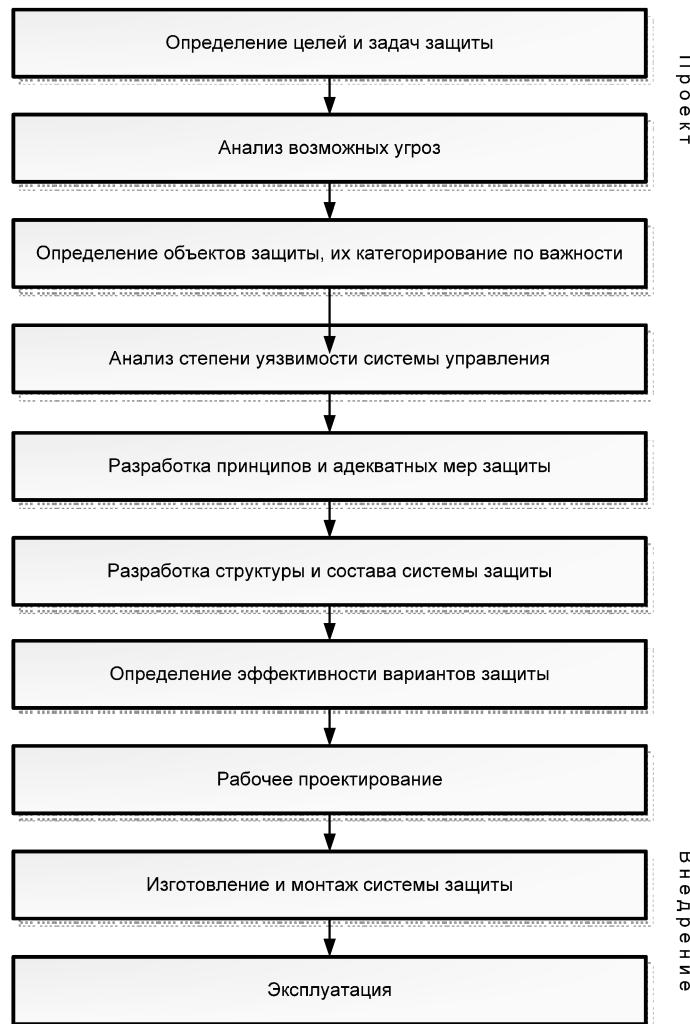


Рис. 8. Алгоритм построения защиты систем управления КВО



**Направления снижения уязвимости систем управления КВО.** Для СУ КВО как сложной технической системы характерны антропогенные, техногенные и стихийные (связанные с поражающими факторами техногенных и природных аварий и катастроф) источники угроз, которые действуют на систему через ее уязвимости, реализуя тем самым механизмы действия угроз.

Анализируя структуру СУ КВО, объекты, подлежащие защите, а также классифицированные источники угроз, уязвимости системы и собственно угрозы, можно определить потенциальные угрозы для конкретной СУ КВО [14].

В общем случае на основе анализа можно выделить три вида уязвимостей систем управления.

*Объективные* — зависящие от особенностей построения и технических характеристик применяемого оборудования. Полное устранение этих уязвимостей невозможно, но они могут существенно ослабляться техническими и инженерно-техническими методами (например, построением структуры систем, повышением стойкости компонентов). К ним можно отнести:

1) определяемые особенностями защищаемой СУ — местоположением элементов системы (наличие удаленных и мобильных элементов системы); организацией каналов передачи управляющей (диагностической) информации (проводные или радиоканалы, информационные сети);

2) определяемые особенностями элементов систем или чувствительностью к воздействию электромагнитного поля, радиации, агрессивных сред, ударных волн и осколков, высокой температуры;

3) сопутствующие техническим средствам излучения — электромагнитным (побочные излучения элементов технических средств, кабельных линий технических средств, усилителей) и электрическим (наводки электромагнитных излучений на линии и проводки, просачивание сигналов в сеть электропитания, в цепи заземления, неравномерность потребления источника электропитания).

*Субъективные* — зависящие от действий персонала, которые могут устраниться организационными и программно-аппаратными методами, включая:

1) ошибки — при подготовке и использовании программного обеспечения (при разработке

алгоритма, инсталляции и загрузке программного обеспечения, эксплуатации программного обеспечения, вводе данных); при управлении системами (организация управления потоками обмена информации); при эксплуатации технических средств (при включении/выключении технических средств, использовании средств обмена информацией);

2) нарушения — режима доступа к техническим средствам; режима эксплуатации технических средств (энергообеспечения, жизнеобеспечения); режима использования информации (обработка и обмен информацией, хранение уничтожение носителей информации).

*Случайные* — зависящие от особенностей окружающей среды и непредвиденных обстоятельств, в их числе:

1) сбои и отказы, вызванные старением, отказами и неисправностями технических средств; старением и размагничиванием носителей информации (дискеты и съемные носители, жесткие диски), микросхем, кабелей и соединительных линий; сбоями программного обеспечения операционных систем, прикладных, сервисных, антивирусных программ; сбоями электроснабжения;

2) повреждения — элементов СУ; жизнеобеспечивающих коммуникаций (электро-, теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования); ограждающих конструкций (внешние ограждения территорий, стены и перекрытия зданий; корпуса с технологическим оборудованием).

Как уже отмечалось, анализ угроз — один из ключевых моментов обеспечения защиты любой СУ. Наибольшую угрозу для СУ при техногенных и природных авариях представляет воздействие поражающих факторов. При определении параметров поражающих факторов следует принимать во внимание возможность совместного воздействия поражающих факторов от различных источников на элементы СУ. Реализация угроз приводит к повреждениям или уничтожению (частичному или полному) элементов СУ или информации.

Действия по снижению уязвимости СУ основаны на управлении базовыми параметрами уязвимости с целью ее минимизации [9, 10, 14] и в основном используют три различных метода, которые могут дополнять друг друга:



1. Общее «усиление» системы — повышение запасов для всех ее элементов и связей без предварительной оценки их уязвимости, предусматривающее наделение системы достаточным внутренним ресурсом, позволяющим противостоять любым внешним дестабилизирующими воздействиям. Данный метод — наиболее затратный и часто приводит к избыточной защите системы от отдельных видов угроз.

2. Локальное «усиление» — снижение уязвимости предварительно идентифицированных наиболее уязвимых элементов системы, когда решается задача предупреждения локальных отказов элементов системы, т. е. инициирующих событий для дальнейшего развития аварии в системе. Метод предусматривает выявление, детальную оценку угроз и повышение защищенности элементов системы к выявленному набору угроз.

3. Изменение структуры системы, позволяющее снизить уязвимость системы в целом путем исключения из структуры системы наиболее опасных и уязвимых взаимосвязей или введения системы резервирования и защиты. Цель этого подхода — исключение в случае отказа отдельных элементов системы каскадных процессов за счет использования нового направления теории управления сложными техническими системами — структурного управления.

#### **Схемы защиты СУ КВО от поражающих факторов.**

Как отмечалось ранее, при организации защиты СУ следует использовать классический принцип эшелонированной защиты, на каждом из последовательных рубежей которой реализации угроз будут препятствовать надежные преграды. Конкретная реализация систем защиты от опасностей, уровень их сложности и эффективности зависят от возможного взаимного положения в пространстве зон опасности и зон расположения элементов СУ.

Эшелонированная защита СУ как средство обеспечения их безопасности состоит из системы защитных барьеров на пути распространения энергетических воздействий и вредных веществ в сторону СУ, системы технических и организационных мер по защите этих барьеров и сохранению их эффективности, мер по прогнозу развития аварийных режимов.

Барьерами безопасности СУ служат:

защищенное исполнение (согласно условиям применения) элементов СУ (первичные пре-

образователи, датчики, линии передачи данных, аппаратура);

схемное построение систем, обеспечивающее живучесть и предусматривающее резервирование, физическое разделение, разнотипность;

защитные оболочки, экраны, кожухи, корпуса; металлические трубы для размещения линий передачи данных; шкафы для аппаратуры;

стены зданий и сооружений, в которых размещаются элементы СУ; подземная прокладка линий передачи данных (в особых случаях — размещение всех элементов СУ в подземных помещениях; в этом случае дополнительным барьером являются грунт и породы);

организационные меры по поддержанию работоспособности всех барьеров.

При построении систем защиты критериями по выбору вида защит должны быть допустимые уровни воздействия на объекты защиты:

для персонала — защита от неконтролируемого выброса опасных веществ (включая токсины, отравляющие, радиоактивные и биологически опасные вещества), снижение интенсивности облучения, теплового воздействия, давления воздушной ударной волны и акустического воздействия до допустимого уровня, защита от первичных и вторичных поражающих факторов, в том числе осколков;

для оборудования и аппаратуры — защита от радиации, агрессивных сред, температур, давления и вибраций, осколков и ударной волны.

В состав систем защиты могут входить предохранительные устройства (плавкие вставки и т. п.). Эти устройства предохраняют элементы СУ от опасных для них входных параметров, причем принцип действия может быть различным в зависимости от характера входного сигнала (механический, электрический, тепловой, радиационный и т. д.) и требований по быстродействию, восстанавливаемости, прочности, ресурсу, надежности и т. п.

На рис. 9 и 10 представлены примеры схем СУ КВО в обычном и в защищенном исполнении.

Кроме того, в состав системы защиты должны входить преграды, укрытия, локализующие системы и т. д. На практике это означает применение защищенных помещений, экранов, защитных оболочек, бронирования, тепловой

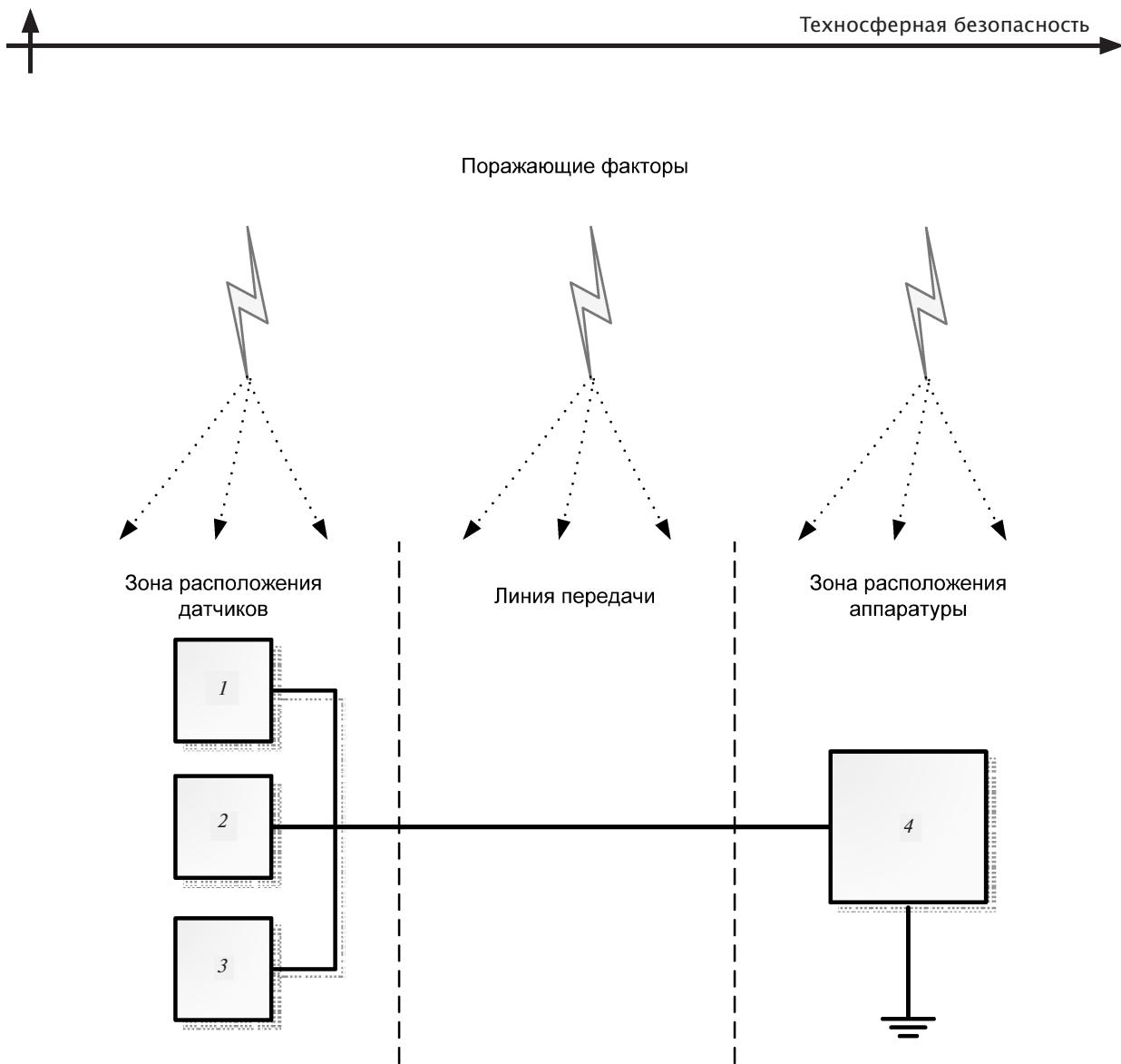


Рис. 9. Схема системы управления в обычном исполнении:

1, 2, 3 — первичные преобразователи (датчики) на опасном объекте; 4 — блок аппаратуры обработки информации

и радиационной защиты, герметизации; прокладка линий связи в трубах (бронерукава) и под землей, защита блоков обработки информации и управления, удаление из опасных зон и разнесение элементов в пространстве и т. п.

Инженерная реализация системы в части технических средств и программного обеспечения должна быть выполнена с учетом повышенной живучести системы в целях сохранения ее работоспособности по выполнению наиболее важных функций при возможных отказах или авариях. Последнее должно достигаться прежде всего за счет использования резервирования компонентов системы и связей между ее отдельными элементами и подсистемами, применения разнородных датчиков и линий связи, а также

за счет повышенной надежности при работе в экстремальных ситуациях измерительных устройств, датчиков, первичных преобразователей и другой аппаратуры. Оценка эффективности защиты основана на количественном или качественном определении способности системы противодействовать угрозам и дается на основе моделирования системы защиты.

В качестве показателя эффективности защиты может применяться вероятность потери работоспособности диагностической системы.

**Анализ защищенности СУ КВО.** Анализ защищенности состояний СУ предполагает учет механических, термических, электромагнитных, радиационных и других воздействий, в том числе при воздействии поражающих факторов.

Поражающие факторы

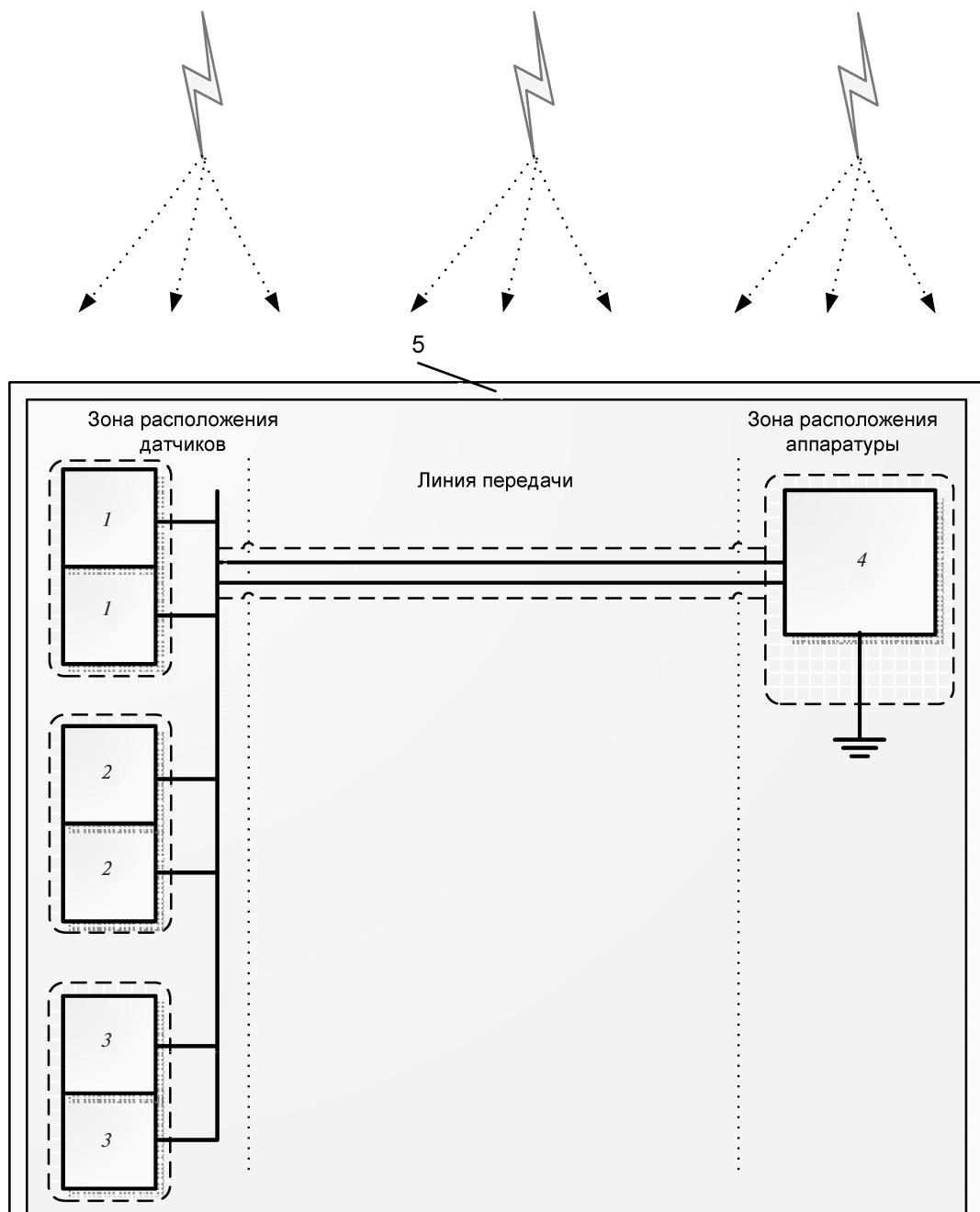


Рис. 10. Схема системы управления в защищенном исполнении:

1, 2, 3 — первичные преобразователи (датчики) на опасном объекте продублированы и защищены;  
 4 — блок аппаратуры обработки информации удален из опасной зоны и защищен



При разработках СУ КВО должна учитываться необходимость обеспечения их комплексной безопасности, включая механическую, радиационную, пожарную, химическую, взрывную, электромагнитную. Создавая алгоритм анализа безопасности  $S$  по критериям рисков  $R$ , целесообразно разрабатывать и использовать единую методологическую базу для оценки безопасности  $S$  и рисков  $R$ , включающую в себя риски по видам опасных воздействий.

Таким образом, в задачах обеспечения безопасности  $S(\tau)$  и защищенности  $Z(\tau)$  СУ КВО базовые параметры безопасности и рисков  $R(\tau)$  как функций  $F[(P(\tau), U(\tau))]$ , отражающих поведение элементов систем (в первую очередь, материалов и подсистем), должны анализироваться по таким составляющим комплексной безопасности, как механическая  $S_m$ , химическая  $S_x$ , пожарная  $S_n$ , взрывная  $S_b$ , электромагнитная  $S_{em}$ , радиационная  $S_p$  (рис.11). Эти виды безопасности определяются через риски  $R$  и их составляющие  $R_m, R_x, R_n, R_b, R_{em}, R_p$ .

Во всех случаях оценки безопасности  $S$  и рисков  $R$  существенное значение имеет определение вероятностей  $P(\tau)$  возникновения и развития во времени  $\tau$  опасных ситуаций.

Решение проблем защищенности и риска должно базироваться на решении проблем живучести, надежности, ресурса и прочности (стойкость к воздействиям). При этом показатели рисков могут рассматриваться как интегральные показатели защищенности, определяемые показателями живучести, надежности, ресурса и прочности (стойкость) рассматриваемой системы.

Основное направление обеспечения защищенности СУ от неблагоприятных ситуаций — реализация основных требований к их работоспособности в штатных и аварийных ситуациях.

Защищенность СУ характеризуется комплексом дифференцированных запасов по прочности (стойкости), надежности, ресурсу, живучести. Иными словами, дифференцированные запасы  $n_i$  по основным допустимым состояниям являются параметрами защищенности рассматриваемой системы.

Поскольку все расчетные параметры имеют вероятностную природу, это означает, что на-

ступление повреждений и отказов во многом связано с авариями и катастрофами и также имеет вероятностный характер.

Запас  $n_i^{(P)}$  по допустимому состоянию должен назначаться с определенной вероятностью  $P_i$  выхода за границы допустимых значений расчетных параметров или не обеспечения условий прочности —  $\sigma \leq [\sigma]$ , ресурса —  $\tau \leq [\tau]$  и т. д., т. е. с определенной вероятностью повреждения, отказа, аварии. При этом оцениваются затраты, связанные с обеспечением этого запаса  $C(n_i^{(P)})$  (с точки зрения выбора физических свойств материалов, компонентов и т. д.) и последствия (ущерб)  $U_i P_i$  от отказа системы при аварии, которая происходит с вероятностью  $P_i$ .

Каждому запасу соответствуют свои значения затрат на его обеспечение (подбор материалов и элементов систем с требуемыми характеристиками) и ожидаемых ущербов (рисков). Поэтому задача поиска оптимального параметра защищенности от определенного типа воздействий (в том числе поражающих факторов) может быть записана в виде

$$\min \{C(n_i^{(P)}) + U_i P_i\}. \quad (4)$$

Каждому значению запаса соответствует определенный набор конструктивных решений параметров и свойств материалов и элементов систем. Выражение (4) справедливо для единовременной оценки.

Методологическую базу комплексного анализа защищенности сложных технических систем (СТС) составляют различные способы формального описания систем защиты на основе графовых моделей. Один из таких подходов, предлагаемый в работе [15] и используемый далее, состоит в следующем. Для формального описания систем защиты предлагается модель системы защиты с полным перекрытием, в которой рассматривается взаимодействие «области угроз», «защищаемой области» и «системы защиты». Таким образом, образуются три множества:  $T = \{t_i\}$  — множество угроз безопасности,  $O = \{o_j\}$  — множество объектов (ресурсов) защищенной системы,  $M = \{m_k\}$  — множество механизмов безопасности СТС.

Элементы этих множеств находятся между собой в определенных отношениях, которые и описывают систему защиты. Для описания

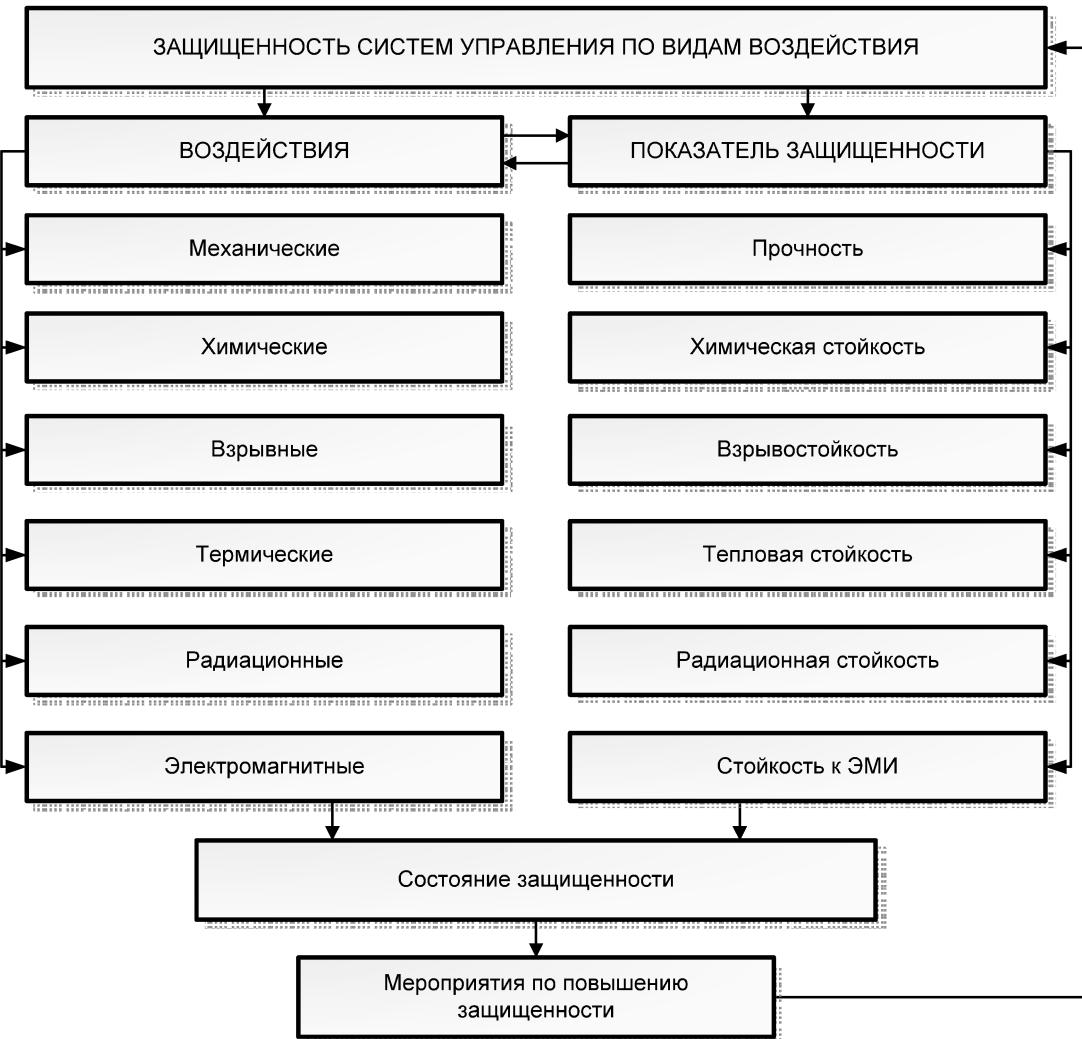


Рис. 11. Блок-схема анализа комплексной защищенности систем управления КВО

системы защиты обычно используется графовая модель. Множество отношений «угроза — объект» образует двухдольный граф  $\{T, O\}$ . Цель защиты состоит в том, чтобы перекрыть все возможные ребра в графе. Это достигается введением третьего набора —  $M$ ; в результате получается трехдольный граф  $\{T, M, O\}$ .

Развитие модели предполагает введение еще двух элементов:

1.  $V$  — набор уязвимых мест, определяемый подмножеством декартова произведения  $T \otimes O$ :  $v_r = \langle t_i, o_j \rangle$ . Под уязвимостью системы защиты понимают возможность осуществления угрозы  $t$  в отношении объекта  $o$ . (На практике под уязвимостью системы защиты обычно понима-

ют не возможность осуществления угрозы безопасности, а те свойства системы, которые способствуют успешному осуществлению угрозы).

2.  $B$  — определяемый декартовым произведением  $V \otimes M$ :  $b_l = \langle t_i, o_j, m_k \rangle$ , набор барьеров, представляющих собой пути осуществления угроз безопасности, перекрытые средствами защиты.

В результате получается система, состоящая из пяти элементов —  $\{T, O, M, V, B\}$ , описывающая систему защиты с учетом наличия в ней уязвимостей.

Для системы с полным перекрытием для любой уязвимости имеется устраняющий ее барьер. Иными словами, в подобной системе защиты



для всех возможных угроз безопасности существуют механизмы защиты, препятствующие осуществлению этих угроз. Данное условие — первый фактор, определяющий защищенность СТС; второй фактор — прочность механизмов защиты.

В идеале каждый механизм защиты должен исключать соответствующий путь реализации угрозы. В действительности же механизмы защиты обеспечивают лишь некоторую степень сопротивляемости угрозам безопасности. Поэтому в качестве характеристик элемента набора барьеров  $b_l = \langle t_j, o_j, m_k \rangle$ ,  $b_l \in B$  может рассматриваться набор  $\langle P_l, L_l, R_l \rangle$ , где  $P_l$  — вероятность появления угрозы,  $L_l$  — величина ущерба при осуществлении угрозы в отношении защищаемых объектов (уровень серьезности угрозы), а  $R_l$  — степень сопротивляемости механизма защиты  $m_k$ , характеризующаяся вероятностью его преодоления.

Прочность барьера  $b_l = \langle t_j, o_j, m_k \rangle$  характеризуют величиной остаточного риска  $R_l$ , связанного с возможностью осуществления угрозы  $t_l$  в отношении элемента сложной системы  $o_j$  при использовании механизма защиты  $m_k$ . Эта величина определяется по формуле

$$R_l = P_k L_k (1 - R_k). \quad (5)$$

Для определения величины защищенности  $Z$  можно использовать следующую формулу:

$$Z = 1 / \sum_{(\forall b_k \in B)} [P_k L_k (1 - R_k)], \quad (6)$$

где  $P_k, L_k \in (0, 1)$ ,  $R_k \in (0, 1)$ .

Знаменатель в (6) определяет суммарную величину остаточных рисков, связанных с возможностью осуществления угроз  $T$  в отношении элементов сложной технической системы  $O$  при использовании механизмов защиты  $M$ . Суммарная величина остаточных рисков характеризует общую уязвимость системы защиты, а защищенность определяется как величина, обратная уязвимости. При отсутствии в системе барьеров  $b_k$ , перекрывающих определенные уязвимости, степень сопротивляемости механизма защиты  $R_k$  принимается равной нулю.

На практике получение точных значений приведенных характеристик барьеров затруднено, поскольку понятия угрозы, ущерба и сопро-

тивляемости механизма защиты часто трудно формализовать.

В том случае, когда возможна оценка ущерба, применимы стоимостные методы оценки эффективности средств защиты. Для этих методов набор характеристик барьера дополняет величина  $C_l$  затрат на построение средства защиты барьера  $b_l$ . В этом случае выбор оптимального набора средств защиты связан с минимизацией суммарных затрат  $W = \{w_l\}$ , состоящих из затрат  $C = \{c_l\}$  на создание средств защиты и возможных затрат при осуществлении угроз  $N = \{n_l\}$ .

Построение моделей системы защиты и анализ их свойств составляют предмет «теории безопасных систем», еще только оформляющейся в качестве самостоятельного направления. Формальные подходы к решению задачи оценки защищенности из-за трудностей, связанных с формализацией, широкого практического распространения не получили. Значительно более действенно использование неформальных классификационных подходов. Вместо стоимостных оценок — категорирование: угроз; объектов защиты; средств защиты (по функциональности и гарантированности реализуемых возможностей) и т. п. Такой подход не дает точных значений показателей защищенности, однако может позволить классифицировать СТС по уровню защищенности и сравнивать их между собой.

В качестве выводов отметим, что обеспечение безопасности систем управления КВО, по существу, заключается в определении множества возможных угроз, оценке величины связанных с ними рисков, выборе адекватных контрмер, реализации этих контрмер и контроле их осуществления.

Для адекватности защиты СУ КВО от предполагаемых угроз проводят категорирование объектов, в результате чего в соответствии с категорией объекта устанавливаются требования к системе защиты СУ. При этом на опасных объектах целесообразна изначальная классификация последствий возможных на них ЧС.

В основе концепции безопасности лежит система (методика) анализа набора угроз, и все меры защиты должны базироваться на результатах данного анализа. Построение эффективного комплекса защитных мер возможно только

относительно определенного, характерного набора угроз.

Организация защиты предполагает идентификацию возможных источников угроз и факторов, способствующих их проявлению (уязвимостей). Все источники угроз делят на классы, обусловленные типом носителя, а классы — на группы по источникам угроз. Уязвимости также можно разделить на классы по принадлежности к источнику уязвимостей, классы — на группы и подгруппы по проявлениям. Существует три основных вида уязвимости систем управления: объективные, субъективные и случайные.

На основании результатов анализа уязвимости определяют адекватные предполагаемым угрозам меры по обеспечению заданного уровня защищенности системы управления, которые представляют собой совокупность инженерно-технических решений и организационных мер. Эффективность защиты СУ КВО характеризуется вероятностью обеспечения защиты от угроз, снижением уязвимости и повышением живучести СУ. Действия по снижению уязвимости СУ основаны на управлении базовыми параметрами уязвимости с целью ее минимизации и используют три различных метода, которые могут дополнять друг друга: общее «усиление» системы; локальное «усиление» — снижение уязвимости наиболее уязвимых элементов системы; изменение структуры системы.

К СУ применимы основные принципы обеспечения безопасности потенциально опасных

и критически важных объектов: принцип эшелонированной защиты, комплексности, единичного отказа, обеспечения надежности и живучести, системный подход и другие. Проектирование защиты СУ должно иметь две стадии: концептуальное и рабочее проектирование. В основе проектирования лежит классический принцип эшелонированной защиты, на каждом из последовательных рубежей которой реализации угроз будут препятствовать надежные преграды.

Методологическую базу комплексного анализа защищенности сложных технических систем (СТС) составляют различные способы формального описания систем защиты на основе графовых моделей. Анализ защищенности состояний СУ предполагает учет механических, термических, электромагнитных, радиационных и других воздействий, в том числе поражающих факторов.

При оценке безопасности  $S$  и рисков  $R$  существенное значение имеет определение вероятностей  $P(\tau)$  возникновения и развития во времени  $\tau$  опасных ситуаций. Решение проблем защищенности и риска должно базироваться на решении проблем живучести, надежности, ресурса и прочности (стойкости к воздействиям). При этом показатели рисков могут рассматриваться как интегральные показатели защищенности ДС, которая характеризуется комплексом дифференцированных запасов по прочности (стойкости), надежности, ресурсу, живучести рассматриваемой системы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белов, С.В.** Безопасность жизнедеятельности [Текст] / С.В. Белов, А.В. Ильинская, А.Ф. Козыяков [и др.] // М.: Высшая школа, — 2007. — 616 с.
2. **Панюков, Д.В.** Создание корпоративной концепции физической защиты [Текст] / Д.В. Панюков // Системы безопасности. — 2006. №2. — С. 65–67.
3. **Александровская, Л.И.** Безопасность и надежность технических систем [Текст]: Учеб. пособие. / Л.И. Александровская, И.З. Аронов, В.И. Круглов [и др.] // М.: Университетская книга. Логос, 2008. — 376 с.
4. **ГОСТ Р 50922–96.** Защита информации. Основные термины и определения [Текст] // Издание официальное. — М.: Госстандарт России, 1996.
5. **Дмитриевский, Е.С.** Конструкторско-технологическое обеспечение эксплуатационной надежности авиационного радиоэлектронного оборудования [Текст]: Учеб. пособие / Е.С. Дмитриевский // СПб.: Изд-во ГУАП, 2001. — 88 с.
6. **Левин, В.И.** Логическая теория надежности сложных систем [Текст] / Левин В.И. // М.: Энерготомиздат, 1985. — 128 с.
7. **Левин, В.И.** Структурно-логические методы исследования сложных систем с применением ЭВМ [Текст] / В.И. Левин // М.: Наука, 1987. — 304 с.
8. **Фролов, К.В.** Безопасность России. Анализ риска и проблем безопасности. Ч.1. Основы анализа риска и регулирования безопасности [Текст] / К.В. Фролов, Ф.Ф. Светик [и др.] // М.: Изд-во МГФ «Знание». 2006. — 640 с.
9. **Махутов, Н.А.** Идентификация определяющих параметров угроз, уязвимости и защищенности критически важных объектов по отношению к превалирующим угрозам природного, техногенного и терро-



ристического характера [Текст] / Н.А. Махутов, В.П. Петров, Д.О. Резников, В.И. Куксова // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций.—2008. №2.— С. 70–77.

10. **Петров, В.П.** Оценка террористического риска и принятие решений о целесообразности построения систем защиты от террористических воздействий [Текст] / В.П. Петров, Д.О. Резников, В.И. Куксова, Е.Ф. Дубинин // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций.—2007. №1. — С. 89–105.

11. **Стекольников, К.И.** Живучесть систем [Текст] / К.И. Стекольников // СПб.: Политехника, 2002.—155 с.

12. **Аверченков, В.И.** Автоматизация выбора состава технических средств системы физической защиты [Текст] / В.И. Аверченков, М.Ю. Рытов, Т.Р. Гайнулин // Вестник Брянского государственного технического университета.—2008. № 4 (20).— С. 58–61.

13. **Алаухов, С.Ф.** Вопросы создания систем физической защиты для крупных промышленных объектов [Текст] / С.Ф. Алаухов, В.Я. Коцеруба // Системы безопасности.—2001. №41.— С. 93.

14. **Махутов, Н.А.** Оценка риска аварий на КВО с учетом возможности реализации экстремальных ущербов [Текст] / Н.А. Махутов, Д.О. Резников, В.П. Петров // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций.—2008. № 5.— С. 57–73.

15. **Астахов, А.** Анализ защищенности корпоративных систем [Электрон. ресурс] / А. Астахов // «Открытые системы».—2002. №7–8 // <http://www.morepc.ru/security/os200207044.html>

16. **Махутов, Н.А.** Обеспечение защищенности и минимизация общих эксплуатационных затрат и ущербов в течение жизненного цикла критически важных объектов путем выбора оптимальных стратегий проведения технических инспекций и ремонта [Текст] / Н.А. Махутов, Д.О. Резников, В.П. Петров, В.И. Куксова // Проблемы анализа риска, том X.—том 5.— 2010. № 3.— С. 34–67.

17. **Гуменюк, В.И.** Методика анализа безопасности транспортно-технологических операций с ядерным топливом [Текст] / В.И. Гуменюк, М.Е. Федосовский, Г.А. Фокин, А.А. Сыров // Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах: Матер. XIV Всеросс. научно-метод. конф. 13–14 мая 2010 г., Санкт-Петербург— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та,— 2010. Т. 2.— С. 242–251.

18. **Гуменюк, В.И.** Обеспечение защищенности и минимизация затрат при перегрузке ядерного топлива на АЭС с реакторами типа ВВЭР [Текст] / В.И. Гуменюк, А.А. Сыров, Г.Л. Атоян // Научно-технические ведомости СПбГПУ.—2011. №2.— С. 294–303.

19. **Гуменюк, В.И.** Программные комплексы, предназначенные для расчета показателей надежности-живучести-безопасности объектов атомной энергетики [Текст] / В.И. Гуменюк, Г.Л. Атоян, М.Е. Федосовский, А.А. Сыров // Материалы XIX междунар. научно-метод. конф. «Высокие интеллектуальные технологии образования и науки».— 9–10 февраля 2012 г. — Т. 4. — С. 53–61.— [Электрон. ресурс] [http://nru.spbstu.ru/scientific\\_events/high\\_technology\\_intelligence\\_of\\_education/](http://nru.spbstu.ru/scientific_events/high_technology_intelligence_of_education/)

УДК 317.774

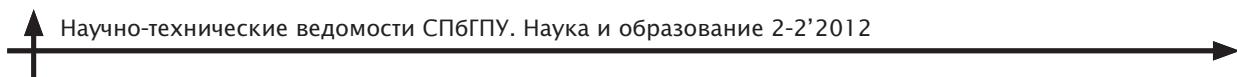
*А.С. Крутолапов, Д.А. Сычёв*

## ПРОЦЕССЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ПОЛЕВЫХ ШИН

Наблюдается тенденция применения информационных технологий при автоматизации различных информационно-управлений процессов. Такие технологии реализуются на основе полевых шин для управления системами пожарной и охранной сигнализации, управления подачей электроэнергии и системой водоснабжения. Цель нашего исследования — оптимизация ресурсов пожарно-охраных и производственных

сетей на основе полевых шин с использованием разработанной модели.

Для построения математической модели процесса информационного обмена рассмотрим потоки случайных событий (запросов) для сети передачи данных (СПД). Узлы сети дискретны и получают доступ к ресурсу не одновременно, т. е. поток запросов ординарен. В сети он идет постоянно, обладая свойством стационарности.



Поскольку неизвестно, какие алгоритмы запрограммированы в узлах, то отсутствует последействие. Следовательно, поток запросов — пуассоновский.

Представим модель СПД с коммутацией сообщений, имеющей  $M$  каналов и  $N$  узлов [6]. В этой модели предполагается, что  $M$  каналов — бесшумны и абсолютно надежны, а пропускная способность  $i$ -го канала равна  $C_i$  (бит в секунду). Все  $N$  узлов, соответствующих центрам коммутации сообщений (пакетов), предполагаются абсолютно надежными и выполняющими операции по коммутации сообщений. Допустим, что время обработки в узлах равно  $K$  и является постоянным и пренебрежимо малым.

В модели имеются очереди к каналам и задержки при передаче. Трафик, поступающий в сеть из внешних источников, образует пуассоновский процесс со средним значением  $\gamma_{jk}$  (сообщений в секунду) для тех сообщений, которые возникают в узле  $j$  и предназначаются для узла  $k$ . Полный внешний трафик, поступающий в систему (и покидающий ее), определяется как

$$\gamma = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \gamma_{jk}.$$

Для определения внешнего трафика  $\gamma$  целесообразно использовать анализатор протокола, который служит основой программно-аппаратного комплекса оптимизации ресурсов сети (статистические данные). Для размещения сообщений в узлах сети имеется память неограниченной емкости. В СПД применяется фиксированная процедура маршрутизации. Это означает, что для данной пары «источник — адресат» в сети имеется только один путь.

Поскольку каждый канал в сети рассматривается как отдельный обслуживающий прибор, обозначим через  $\lambda_i$  среднее число сообщений в секунду, проходящих по  $i$ -му каналу. Как и для внешнего трафика, определим полный трафик в каналах сети:

$$\lambda = \sum_{i=1}^M \lambda_i.$$

Пусть стоимость построения  $i$ -го канала с пропускной способностью  $C_i$  задается произвольной функцией  $d_i(C_i)$ , зависящей от номера и пропускной способности канала. Тогда  $D$  —

стоимость всей сети, которая состоит из стоимости построения каналов:

$$D = \sum_{i=1}^M d_i(C_i). \quad (1)$$

Примем среднюю задержку сообщения  $T$  за главную характеристику сети. Определим среднюю величину  $Z_{jk}$  как задержку сообщения, которое возникло в узле  $j$  и имеет местом назначения узел  $k$ . Эти две средние величины связаны равенством

$$T = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \frac{\gamma_{jk}}{\gamma} Z_{jk}, \quad (2)$$

так как доля  $\frac{\gamma_{jk}}{\gamma}$  полного входящего трафика сообщений имеет в среднем задержку, равную  $Z_{jk}$ . Это равенство представляет разложение сети по парам «источник — адресат» [2–4]. Получена открытая многопотоковая сеть массового обслуживания.

Рассматривая фиксированную процедуру выбора маршрутов, обозначим через  $\pi_{jk}$  путь, по которому идут сообщения, возникающие в узле  $j$  и идущие в узел  $k$ . В путь  $\pi_{jk}$  включен  $i$ -й канал (с пропускной способностью  $C_i$ ), если сообщения, идущие по этому пути, проходят указанный канал ( $C_i \in \pi_{jk}$ ). Отсюда средняя интенсивность потока сообщений  $\lambda_i$  в  $i$ -м канале должна равняться сумме средних интенсивностей потоков сообщений по путям, которые проходят через этот канал:

$$\lambda_i = \sum_j \sum_k \gamma_{jk}, \quad j, k : C_i \in \pi_{jk}.$$

Определим  $T_i$  как время, затраченное на ожидание при передаче по  $i$ -му каналу. Это среднее время, проведенное сообщением в системе (под системой понимается  $i$ -й канал, обслуживающий пользователя, и очередь сообщений, стоящая перед этим каналом).

Среднее число сообщений, ожидающих или использующих канал, равно

$$\bar{N}_i = \lambda_i T_i.$$

Среднее число сообщений в сети равно

$$\bar{N} = \gamma T = \sum_{i=1}^M \bar{N}_i.$$



Отсюда

$$T = \sum_{i=1}^M \frac{\lambda_i}{\gamma} T_i. \quad (3)$$

Рассматриваемая задача анализа  $T$  свелась просто к вычислению  $T_i$ .

Погруженный канал можно рассматривать как такой же канал, действующий независимо от сети, но с пуассоновским потоком на входе, интенсивность которого равна интенсивности, задаваемой сетью. Теперь  $i$ -й канал можно представить в виде системы  $M/M/1$  с пуассоновским потоком интенсивности  $\lambda_i$  на входе и показательным временем обслуживания со средним  $1/\mu$  с. Решение для  $T_i$  получается из равенства

$$T_i = \frac{1}{\mu_i - \lambda_i}$$

и согласно (3) равно

$$T = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^M \frac{\lambda_i}{\mu_i - \lambda_i}.$$

При получении основного результата были сделаны предположения, что время обработки в узле и время распространения равны нулю.

Используя этот анализ задержки, можно сделать количественные выводы в отношении средней задержки сообщения в СПД. При увеличении нагрузки на сеть никакое слагаемое в выражении для задержки не будет доминирующим до тех пор, пока поток в одном из каналов не достигнет пропускной способности этого канала, который соответствует «узкому» месту сети.

Задачи, связанные с СПД, состоят не только в ее анализе, но и в эффективном и оптимальном проектировании. При любом проектировании практической сети приходится решать большое число задач. К их числу относятся выбор пропускных способностей каналов, принятие процедуры выбора маршрутов, выбор процедуры управления потоками, топологическое проектирование сети, выбор емкости памяти в каждом узле [1]. Рассмотрим три основных выбора, используемых при проектировании алгоритма [5]:

пропускных способностей каналов  $\{C_i\}$  ;  
потоков в каналах  $\{\lambda_i\}$  ;  
топологии.

Входящие в них параметры можно варьировать с целью улучшения характеристик сети.

Определим одномерный критерий качества системы (среднюю задержку сообщения  $T$ ) и минимизируем его (тем самым оптимизируя работу сети). Так как для задач оптимизации требуется включать некоторые стоимостные ограничения, то введем ограничение (2) на стоимость. Итак, имеются характеристики сети  $T$ , стоимостное ограничение  $D$  и три варьируемых при проектировании параметра:  $\{C_i\}$ ,  $\{\lambda_i\}$  и топология сети.

При фиксированной процедуре выбора маршрутов доля трафика  $r_{ij}$ , который выходит из узла  $i$  по каналу, соединяющему узлы  $i$  и  $j$ , равна 0 либо 1 в зависимости от места возникновения и места назначения этого трафика сообщений. При этом подразумевается, что оптимальный выбор трафика в канале  $\{\lambda_i\}$  включает отыскание для каждой линии таких теоретических средних интенсивностей потоков сообщений, которые дают минимальную среднюю задержку сообщения.

Определим теперь задачу оптимизации, которая в качестве исходных данных включает множество переменных, варьируемых при проектировании сети. Считается, что заданы положения узлов, требования к внешнему трафику  $\gamma_{jk}$ , стоимости каналов  $d_i(C_i)$ , постоянная  $D$ , а также предполагается, что используемые потоки  $\{\lambda_i\}$  являются реализуемыми (то есть они согласуются с пропускными способностями и ограничениями на внешний трафик, а также удовлетворяют закону сохранения).

Решение происходит в четыре этапа [5].

*Первый этап.* Выбор пропускных способностей. Дано: потоки  $\{\lambda_i\}$  и топология сети. Минимизировать:  $T$ . Варьируются:  $\{C_i\}$ . Ограничение (1).

*Второй этап.* Распределение потоков. Дано:  $\{C_i\}$  и топология сети. Минимизировать:  $T$ . Варьируются:  $\{\lambda_i\}$ .

*Третий этап.* Выбор пропускных способностей и распределение потоков. Дано: топология сети. Минимизировать:  $T$ . Варьируются:  $\{C_i\}$  и  $\{\lambda_i\}$ . Ограничение (1).

*Четвертый этап.* Выбор топологии, пропускных способностей и распределения потоков. Минимизировать:  $T$ . Варьируются: топологические варианты,  $\{C_i\}$  и  $\{\lambda_i\}$ . Ограничение (1).

В работе сформулирована задача оптимизации проектирования сети на основе полевых



шин. При этом варьируются положения узлов, требования к трафику, стоимость каналов, а также предполагается, что используемые потоки реализуемы. Решение задачи позволяет опти-

мально распределить ресурсы проектируемой сети. Решение оптимизационной задачи в значительной степени зависит от вида стоимостной функций  $d_i(C_i)$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Авен, О.И.** Оценка качества и оптимизация вычислительных систем [Текст] / О.И. Авен, Н.Н. Гурин, Я.А. Коган.— М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982.— 464 с.
2. **Айвазян, С.А.** Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных [Текст] / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин.— М.: Финансы и статистика, 1985.— 198 с.
3. **Айвазян, С.А.** Прикладная статистика. Исследование зависимостей [Текст] / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин.— М.: Финансы и статистика, 1985.— 198 с.
4. **Айвазян, С.А.** Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности [Текст] / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин.— М.: Финансы и статистика, 1989.— 268 с.
4. **Башарин, Г.П.** Теория сетей массового обслуживания [Текст] / Г.П. Башарин.— М.: Наука, 1983.— 145 с.
4. **Гнеденко, Б.В.** Введение в теорию массового обслуживания / Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко.— М.: Наука, 1987.— 224 с.



# ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 628.336:628.472:504.06

*В.И. Масликов, А.Н. Чусов,  
Е.Ю. Негуляева, А.В. Черемисин, Д.В. Молодцов*

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛОЖЕНИЯ ОТХОДОВ В БИОРЕАКТОРАХ ДЛЯ ОЦЕНКИ БИОГАЗОВОГО ПОТЕНЦИАЛА И ВЫБОРА МЕРОПРИЯТИЙ ПО РЕКУЛЬТИВАЦИИ ПОЛИГОНОВ ТБО

Определение эмиссий биогаза и фильтрата имеет большое значение для оценки состояния полигонов твердых бытовых отходов (ТБО) и их воздействия на окружающую среду как в период эксплуатации, так и после закрытия. Поскольку натурные исследования весьма трудоемки, дорогостоящи и требуют большого времени, исчисляемого десятилетиями, получило распространение определение этих данных расчетным путем. Разработано значительное количество математических моделей определения газовых и водных эмиссий при разложении отходов в зависимости от различных исходных параметров. Разнообразие математических моделей отражает сложность и многообразие процессов, происходящих на полигонах, но затрудняет выбор универсальной модели [1, 2]. Модели, как правило, учитывают лишь небольшой ряд факторов, которые могут быть заданы в некотором приемлемом диапазоне или легко контролируются. Поэтому корректный выбор модели можно сделать, только сопоставляя результаты расчета с экспериментальными данными, полученными в лабораторных условиях.

Особый интерес представляет опыт Германии, где были созданы лабораторные комплексы и разработаны технологии физического моделирования процессов разложения твердых бытовых отходов. Это позволило создать универсальную технологию, наиболее полно воспроизводящую процессы, происходящие в естественных условиях, и дающую возможность ускорить их в десятки и сотни раз. Кроме того, были разработаны нормативы на проведение лабораторных исследований, использу-

емое оборудование, методики анализа и др., что обеспечивает корректность сопоставления и использования полученных результатов.

Технология лабораторного моделирования состоит в том, что исследуемый материал помещают в герметично закрытый биореактор, в котором поддерживается режим, соответствующий условиям полигона.

Создавая оптимальные условия в биореакторах, можно ускорить разложение отходов в десятки и более раз и за несколько месяцев работы лабораторной установки наблюдать за процессами, происходящими в естественных условиях в течение многих десятков лет, получая при этом необходимую информацию, на основе которой создаются и корректируются расчетные модели [3].

В СПбГПУ была освоена методика проведения эксперимента в малых биореакторах объемом около 9 л с модельными образцами отходов, создаваемыми на основе данных о морфологическом составе ТБО, захораниваемых на конкретных полигонах. Это позволяет отказаться от транспортировки загрязненных образцов с действующих объектов. Преимуществами малых биореакторов по сравнению с большими (120 л) являются: возможность варьирования состава отходов; повышение безопасности при проведении эксперимента (так как исследования выполняются с небольшими объемами ТБО), а также существенное снижение затрат. При этом обеспечивается возможность получения всей необходимой информации. С этой целью был модернизирован лабораторный комплекс «Биореактор» [4].



Были подготовлены три малых биореактора объемом около 9 литров каждый и проведены две серии экспериментов с модельными образцами отходов (см. табл. 1), соответствующих среднему морфологическому составу ТБО двух крупных городов государств Центральной Азии, аналогичных южным регионам России.

В качестве стабилизатора для обеспечения устойчивого процесса метаногенеза использовался компост шестинедельной зрелости, отобранный с площадки хранения завода МПБО-2 Санкт-Петербурга.

В биореакторы были заложены следующие композиционные смеси:

*Модельный образец № 1*

100 % масс. — компост для учета его степени влияния в смесях с отходами (биореактор №1—1);

70 % масс. модельного образца ТБО №1 и 30 % масс. компоста (биореактор №2—1);

50 % масс. модельного образца ТБО №1 и 50 % масс. компоста (биореактор №3—1).

*Модельный образец № 2*

100 % масс. компоста для учета его степени влияния в смесях с отходами (биореактор №1—2);

70 % масс. модельного образца ТБО №2 и 30 % масс. компоста (биореактор №2—2);

50 % масс. модельного образца ТБО №2 и 50 % масс. компоста (биореактор №3—2).

**Морфологический состав исследуемых образцов отходов, % масс.**

Наименование компонентов	Образец №1	Образец №2
Пищевые отходы	19	23,4
Песок	27	0
Ветки, листья	14	0
Бумага, картон	7	27,8
Стекло	4	8,6
Текстиль	4	1,3
Кости	2	0,1
Пластик	3	14,2
Металл	3	1,6
Кожа	1	0,4
Древесина	1	2,4
Камни, штукатурка	1	9,2
Прочие	14	11

На рис. 1 представлен вид лабораторной установки с малыми биореакторами.

При проведении эксперимента осуществлялся еженедельный контроль эмиссии и состава биогаза, а так же основных показателей химического состава фильтрата и твердого вещества (при загрузке и выгрузке отходов).



Рис. 1. Лабораторная установка

На рис. 2 и 3 приведены графики эмиссии биогаза из биореакторов №2—1, №2—2 и №3—1, №3—2. Эмиссия биогаза из биореакторов №1—1 и №1—2 не наблюдалась вследствие минерализации компоста.

На рис. 4 и 5 приведены графики компонентного состава биогаза соответственно из биореакторов №2—1, №2—2 и №3—1, №3—2

Сопоставление результатов экспериментов с модельными образцами отходов №1 и №2 показывает существенное влияние состава отходов на процессы разложения и соответственно на количество образующегося биогаза, интенсивность его выделения, содержание метана и углекислого газа.

Для модельного образца отходов №1, чтобы обеспечить устойчивый процесс метаногенеза, достаточно наличие 30 % масс. стабилизатора. При проведении исследования было выявлено,

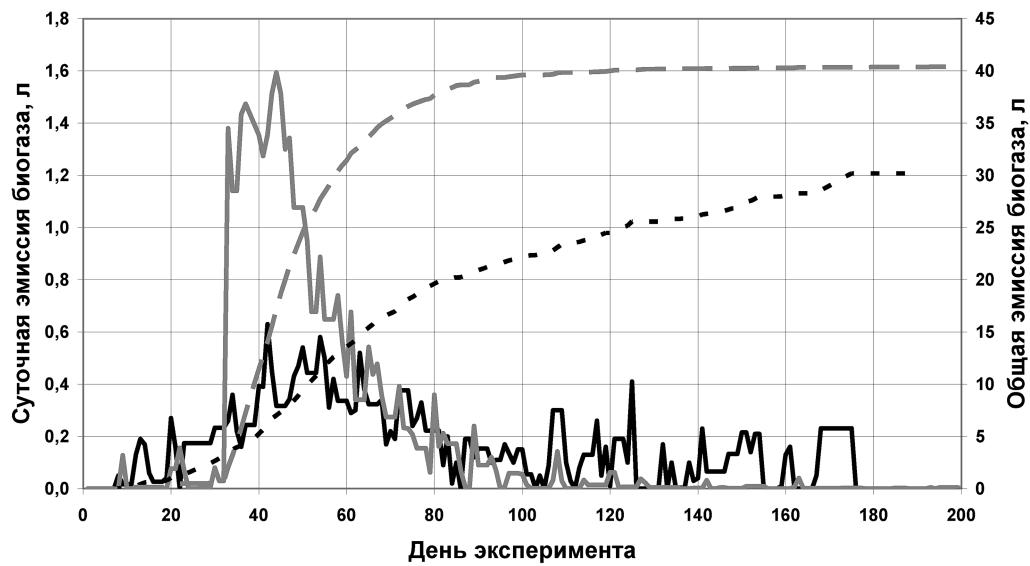


Рис. 2. Эмиссия биогаза из биореакторов №2-1 и №2-2:

- суточная эмиссия (обр. № 1); — суточная эмиссия (обр. № 2);
- общая эмиссия (обр. № 1); — общая эмиссия (обр. № 2)

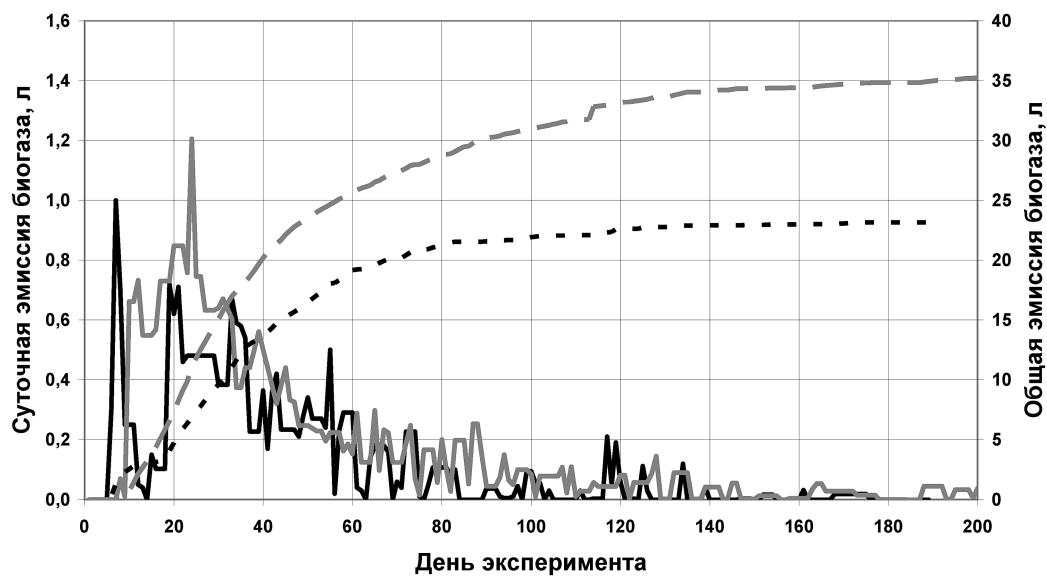


Рис. 3. Эмиссия биогаза из биореакторов №3-1 и №3-2:

- суточная эмиссия (обр. № 1); — суточная эмиссия (обр. № 2);
- общая эмиссия (обр. № 1); — общая эмиссия (обр. № 2)

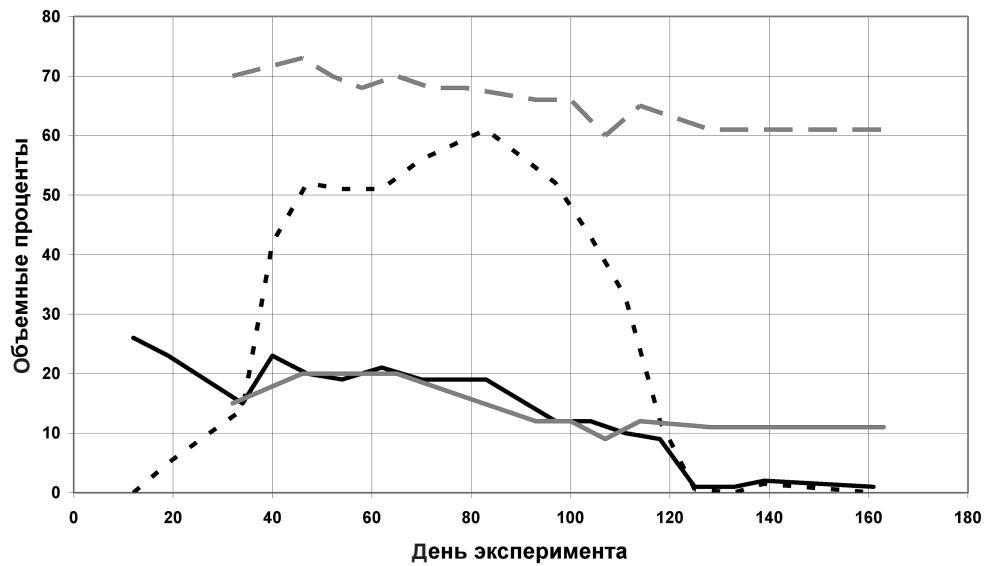


Рис. 4. Состава биогаза из биореакторов №2-1 и №2-2:  
 — — CO<sub>2</sub> (обр. № 1); - - - CH<sub>4</sub> (обр. № 1); — — CO<sub>2</sub> (обр. № 2); — · — CH<sub>4</sub> (обр. № 2)

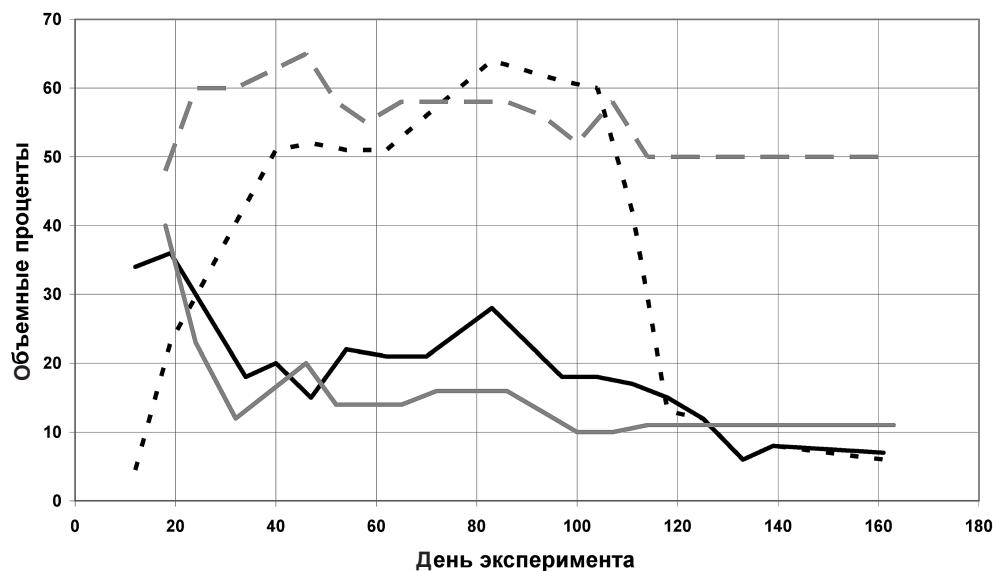


Рис. 5. Состава биогаза из биореакторов №3-1 и №3-2:  
 — — CO<sub>2</sub> (обр. № 1); - - - CH<sub>4</sub> (обр. № 1); — — CO<sub>2</sub> (обр. № 2); — · — CH<sub>4</sub> (обр. № 2)

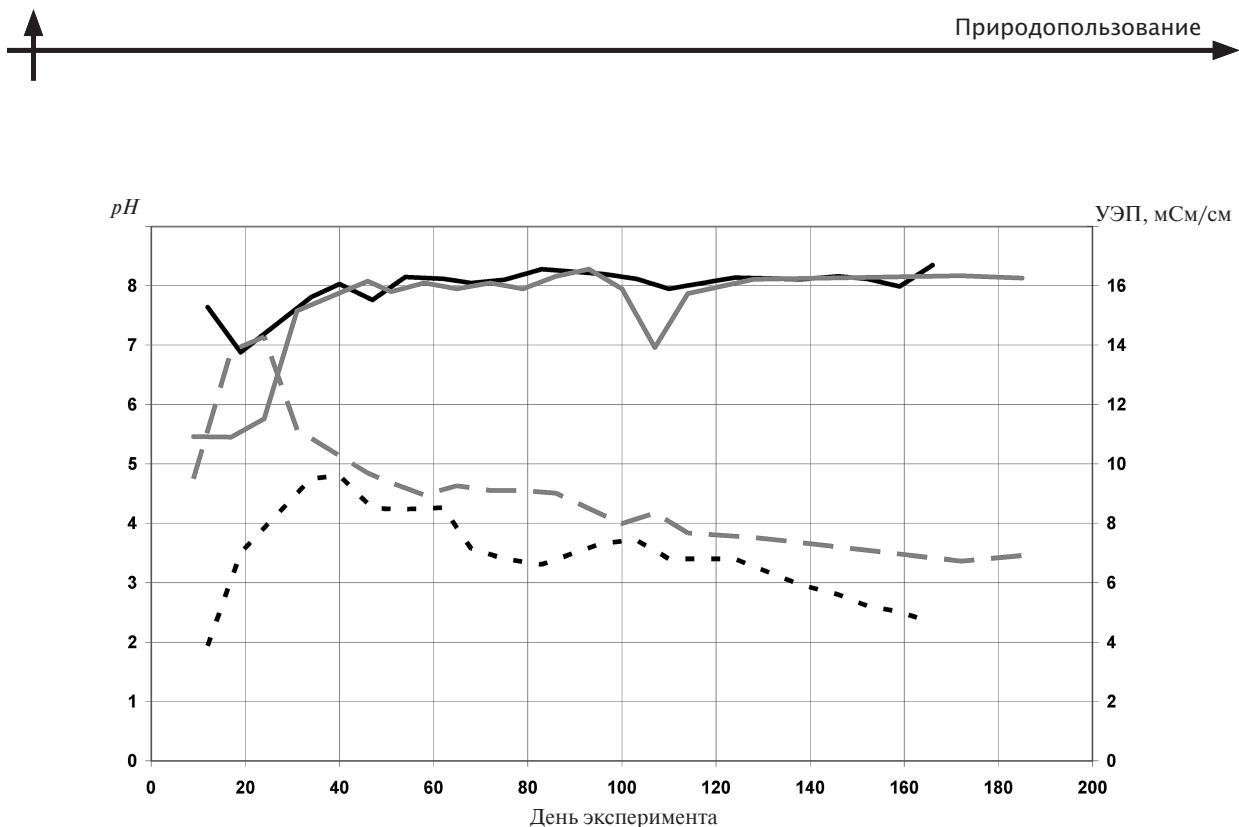


Рис. 6. Показатели фильтрата из биореакторов №2–1 и №2–2:

—  $pH$  (обр. № 1) —  $pH$  (обр. № 1); - - - УЭП (обр. № 2); — УЭП (обр. № 2)

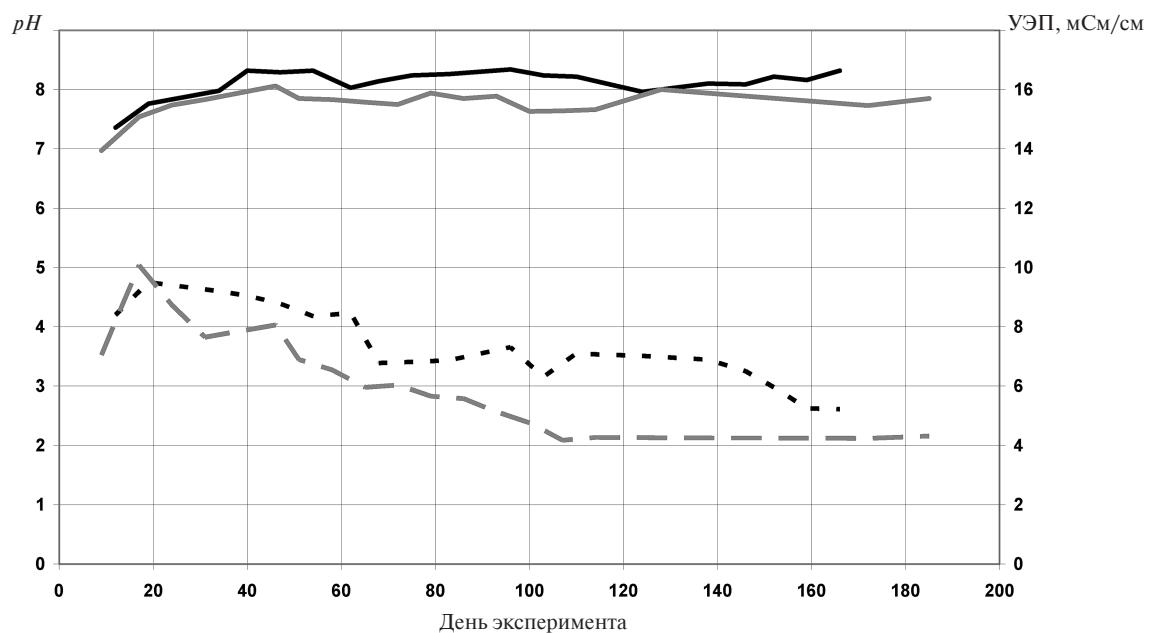


Рис. 7. Показатели фильтрата из биореакторов №3–1 и №3–2:

—  $pH$  (обр. № 1) —  $pH$  (обр. № 1); - - - УЭП (обр. № 2); — УЭП (обр. № 2)

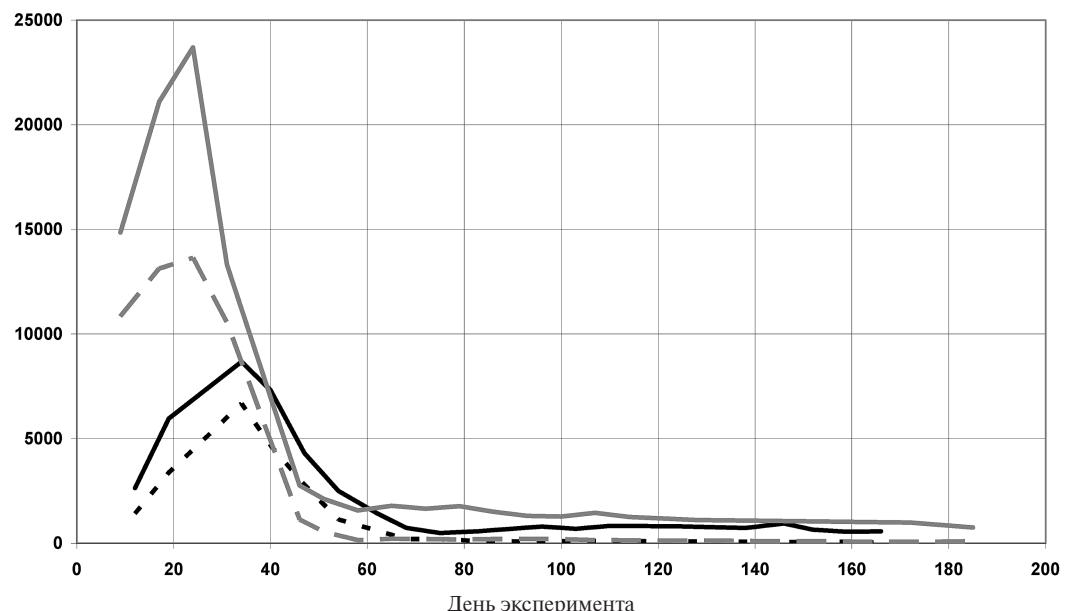


Рис. 8. Показатели фильтрата из биореакторов №2-1 и №2-2:  
 — — ХПК, мгО/л (обр. № 1); - - - БПК5, мгО2/л (обр. № 1); — — ХПК, мгО/л (обр. № 2);  
 — — БПК5, мгО2/л (обр. № 2)

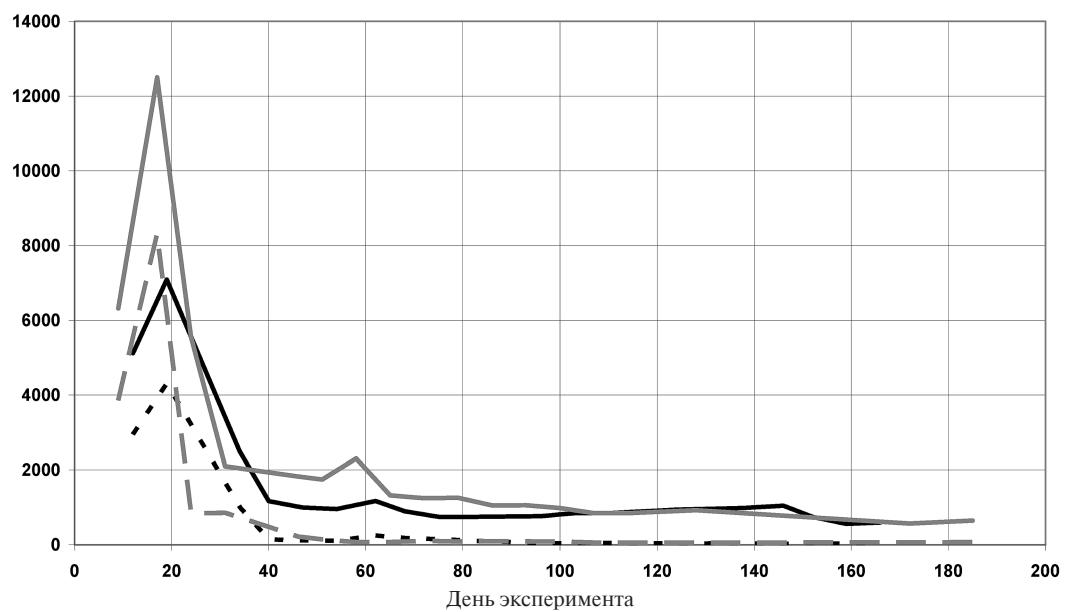


Рис. 9. Показатели фильтрата из биореакторов №3-1 и №3-2:  
 — — ХПК, мгО/л (обр. № 1); - - - БПК5, мгО2/л (обр. № 1); — — ХПК, мгО/л (обр. № 2);  
 — — БПК5, мгО2/л (обр. № 2)



что в биореакторе №3–1 удельная эмиссия биогаза составляет 15 л/кг сух. в-ва (15 м<sup>3</sup>/т сух. в-ва), а в биореакторе №2–1 – 20 л/кг сух. в-ва (20 м<sup>3</sup>/т сух. в-ва). Низкие значения удельной эмиссии биогаза за период лабораторных исследований можно объяснить большим содержанием инертных веществ (37 % масс.), а также полимерных и других трудно разлагаемых материалов (20 % масс.) в отходах. Содержание метана в биогазе из биореакторов № 2 и № 3 составляет 50–60 % по объему. Соответственно, содержание углекислого газа составляет 20–35 % по объему.

Применительно к модельному образцу №2 было выявлено, что в ходе выполнения эксперимента в биореакторе № 2–2 в течение месяца процессы метаногенеза не наблюдались ввиду затяжной кислотной фазы процесса (*pH* = 5,4). В течении четырех дней производилась промывка отходов свежей водой. В результате *pH* повысился до 7,5. Началась стадия метаногенеза, что было подтверждено появлением в биогазе метана. В течении 30 дней наблюдалась интенсивная эмиссия биогаза (до 1,6 литров в сутки с содержанием метана до 65–70 %). Следует отметить аналогичность форм кривых эмиссии биогаза из биореакторов №2–2 и №3–2 в период стадии метаногенеза. Данный эксперимент показал необходимость проведения дополнительных тестов с образцами отходов, чтобы определить количество стабилизирующего вещества, требуемое для создания условий метаногенеза в исследуемой смеси ТБО. При проведении исследования было выявлено, что в биореакторе № 2–2 удельная эмиссия биогаза составляет 38 л/кг сух. в-ва (38 м<sup>3</sup>/т сух. в-ва), а в биореакторе № 3–2 – 43 л/кг сух. в-ва (43 м<sup>3</sup>/т сух. в-ва). Содержание метана в биогазе из биореакторов № 3 и № 2 составляет 50–70 % по объему. Соответственно,

содержание углекислого газа равно 10–35 % по объему.

По результатам эксперимента было установлено, что эмиссия биогаза из биореакторов № 2–1, № 2–2 и № 3–1, № 3–2 описывается математической моделью Табасарана.

В ходе экспериментов определялись показатели фильтрата (*pH*, электропроводимость, БПК<sub>5</sub>, ХПК и другие), позволяющие контролировать стадии процесса разложения исследуемых образцов отходов и степень их минерализации. На рис. 6–9 приведены графики изменения основных показателей фильтрата образцов №1 и №2 отходов за время проведения эксперимента.

Анализ графиков показывает, что для стабильного начала и протекания процесса метаногенеза в исследуемом образце весовая доля минерализованного компоста в биореакторах должна составлять не менее 50 %. При этом уровень *pH* в фильтрате – около 8.

По величине БПК<sub>5</sub> и ХПК можно контролировать содержание органического вещества на текущий момент времени, что крайне важно для уточнения математических моделей оценки эмиссии биогаза. Кроме того показатели БПК<sub>5</sub> и ХПК характеризуют содержание остаточного углерода и степень разложения отходов. Эта информация необходима для расчета систем аэрации с целью окончательной минерализации свалочных масс и их перевода в инертное состояние при рекультивации полигонов ТБО.

Определив коэффициент ускорения процессов разложения отходов в биореакторах, можно пересчитать данные лабораторных экспериментов «на натуру», что позволит прогнозировать эмиссию и состав биогаза с полигонов ТБО на расчетный период времени и обосновывать мероприятия по использованию их энергетического потенциала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bogon, H.** Deponiegasprognose: Worauf kommt es an? Neustadt am Rbge [Текст] / H. Bogon // Praxistagung Deponien.— www.wasteconsult.de.— 2005.— 14 S.
2. **Ehrig, H.-J.** Sickerwasser aus Hausmülldeponien, Menge und Zusammensetzung [Текст] / H.-J. Ehrig // Müll und Abfall, Lfg. 1/89.— Beseitigung von Abfall durch Ablagerung, 4587: 1–39; Berlin.
3. **Spendlin, H.-H.** Untersuchungen im Labormaßstab zur Beschleunigung der anaeroben biochemischen Umsetzungsprozesse in Mülldeponien [Текст] / H.-H. Spendlin, R. Stegmann.— Hamburg: BMFT-Forschungsbericht Feste Abfallstoffe, 1988.— 71 S.
4. **Федоров, М.П.** «Углеродные» инвестиции в энергетическое использование полигонов ТБО [Текст] / М.П. Федоров, В.В. Кораблев, В.И. Мас-ликов, Е.О. Иокша // Экология и жизнь : научно-популярный и образовательный журнал.— 2008. №4(77). – С. 16–22.

УДК 536.423.4

*К.М. Арефьев, В.К. Арефьев,  
Е.Д. Федорович, М.Х. Шаркави*

## **ТЕПЛОМАССООБМЕН В СИСТЕМЕ ОПРЕСНЕНИЯ МОРСКОЙ ВОДЫ С СОЛНЕЧНЫМ НАГРЕВАТЕЛЕМ**

Получение охлажденной воды в промышленных масштабах осуществляют сейчас главным образом выпариванием солей из морской воды, используя теплоту сгорания органического топлива, а также установки обратного осмоса. Эти способы — весьма энергоемки. В условиях возрастающего дефицита и повышения стоимости органического топлива во многих странах мира ведутся изыскания альтернативных способов охлаждения морской воды. Следует учитывать, что постоянно возрастающая потребность в пресной воде должна удовлетворяться как ее крупнотоннажными производствами (для нужд мегаполисов и промышленных производств), так и относительно маломощными установками (для местных нужд и сельхозпроизводства). В первом случае перспективно использование ядерного энергоисточника, экономичность которого растет с ростом его мощности. Во втором случае целесообразно использовать местные энергоисточники. Для территорий с большим числом солнечных дней в году в этих целях весьма перспективно использование энергии Солнца.

Настоящее исследование было инициировано в связи с разработками систем охлаждения на солнечной энергии, начатыми в Массачусетском технологическом институте (США) совместно с Университетом нефти и минеральных ресурсов им. короля Фахда (Саудовская Аравия). Приведенные в публикации [1] результаты этих разработок относятся главным образом к термодинамическому анализу возможных циклов охлаждающих установок. Исследования [1] не касались внутренних теплообменных процессов в отдельных элементах оборудования этих установок. В то же время ясно, что реальная их осуществимость зависит и от возможностей реализации процессов течения и теплообмена теплоносителей (в данном случае — вода, воздух) в аппаратах реальных размеров, от их стоимости и т. п.

В работе [1] приведены результаты сравнения двух различных типов установок охлаждения — с подогревом от солнечного источника циркулирующей в системе воды и с подогревом циркулирующей в ней воздуха. В обоих случаях общая идея организации процесса одинакова. Эта идея состоит в увлажнении потока воздуха путем разбрзгивания и испарения в нем капель морской воды с последующей конденсацией парового компонента влажного воздуха, освобожденного от солей.

В схеме с подогревом воды в аппарат-увлажнитель подается от нагревателя горячая вода, а в схеме с подогревом воздуха на вход в увлажнитель подается вода, нагретая в конденсаторе. В обеих схемах воздух циркулирует по замкнутому контуру, отводящаяся из увлажнителя часть морской воды («рассол») удаляется из системы, а охлажденный компонент отводится из осушителя — конденсатора.

В работе [1] показаны следующие преимущества второй схемы по сравнению с первой, определившие наш выбор именно второй схемы для более подробного анализа: вторая схема действует при более высоком температурном уровне в нагревателе; поскольку водяной поток в увлажнителе передает теплоту воздушному потоку, общая степень регенерации (возврат теплоты) в цикле получается большей во второй схеме.

В целом производительность (по пресной воде) второй схемы примерно на 25 % выше, чем первой, при одинаковых температурных уровнях и одинаковой подводимой к системе тепловой мощности.

На рис. 1 показан вариант системы охлаждения, действующей по схеме с подогревом влажного воздуха. В ней в целях дополнительного повышения производительности установки минимизирована влажность воздуха после осушителя-конденсатора при одновременном повышении влажности после увлажнителя. Этот

эффект достигается за счет включения в схему термокомпрессора (вместо механического вентилятора) с пароструйным эжектором. Таким образом, после увлажнителя давление воздуха растет, а влажность падает.

Цель настоящей статьи — наряду с изложением общего принципа действия установки опреснения морской воды с солнечным нагревателем — проведение детального анализа процесса в ключевом для всей системы аппарате, а именно в осушителе нагретого воздуха — конденсаторе водяного пара, охлаждаемом морской водой.

Для выполнения расчетных оценок этого процесса необходимо определиться с входными параметрами теплоносителей (охлаждающая вода, влажный воздух), а также задаться геометрическими размерами каналов конденсатора.

В качестве рабочего диапазона входных параметров был взят диапазон, рекомендуемый в [1].

Термодинамические и балансовые расчеты позволяют подобрать необходимые сочетания расходов влажного воздуха и охлаждающей воды в различных условиях. Однако реальные представления о полноте выделения влаги в конденсаторе можно получить лишь при выполнении полных теплогидравлических расчетов. Задача усложняется тем, что в конденсаторе нужно не только получить пресную воду, но и нагреть охлаждающую морскую воду от входной температуры до  $60^{\circ}\text{C}$  или выше. При этом объемный расход охлаждающей воды должен быть очень небольшим из-за высокой плотности и теплопроводности воды.

Конструктивная схема конденсатора принятая в виде обменивающихся теплотой плоских каналов для паровоздушной смеси и охлаждающей воды (пластинчатый теплообменник). Ширина каналов прямоугольного сечения по длинной стороне — 100 мм; длина (высота) каналов — 2000 мм. Ширина каналов по короткой стороне (зазор) для влажного воздуха — 50 мм, а для охлаждающей конденсатор воды — 3 мм.

Относительное движение воздуха и воды в конденсаторе — противоточное: воздух — вниз, охлаждающая вода — вверх.

Для проведения моделирования тепломассобмена при конденсации воды из влажного воз-

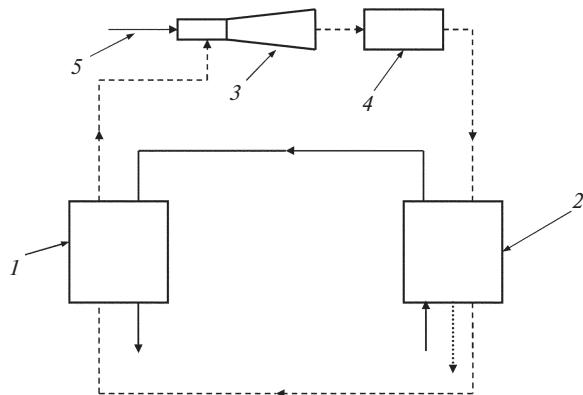


Рис. 1. Схема опреснительной установки с подогревом влажного воздуха:

1 — увлажнитель; 2 — конденсатор; 3 — пароструйный эжектор; 4 — солнечный нагреватель воздуха; 5 — подача пара на эжектор; — воздух; — морская вода; — конденсат

духа в этих каналах были разработаны алгоритм и компьютерная программа.

Алгоритм и компьютерная программа составлены на основе дифференциальных уравнений тепло- и массообмена для влажного воздуха и теплообмена для воды.

В уравнении для тепломассообмена в воздушном канале учтено влияние стефановского потока. Стефановский поток при конденсации на поверхности вызывается уходом массы пара при фазовом переходе на этой поверхности. Возникает поток среды к поверхности, увеличивающий диффузию пара. Вывод формулы для стефановского потока приводится, например, в статье [2] (для двухкомпонентной смеси «пар — неконденсируемый газ»).

В программе плотность потока пара определяется аналогичной приведенной в [2] формулой

$$g_{\pi} = \alpha_D \frac{\mu_{\pi} P}{RT} \ln \frac{1 - \frac{P_{\pi}}{P}}{1 - \frac{P_{\pi s}}{P}}, \quad (1)$$

где  $P$  — давление влажного воздуха;  $P_{\text{н}}$  — парциальное давление пара в потоке влажного воздуха;  $P_{\text{пн}}$  — парциальное давление пара у поверхности пленки конденсата;  $\mu_{\text{н}}$  — молекулярная масса пара;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — температура влажного воздуха;  $\alpha_d$  — коэффициент массоотдачи.



Коэффициент массоотдачи определяется формулой

$$\alpha_D = \frac{Nu_D D_{12}}{d_{\text{экв}}}, \quad (2)$$

где  $Nu_D$  — диффузионное число Нуссельта;  $d_{\text{экв}}$  — эквивалентный диаметр воздушного канала;  $D_{12}$  — коэффициент взаимной диффузии в паровоздушной смеси [3].

В программе учитывается перенос теплоты к поверхности пленки конденсата потоком пара, а также конвективный теплоперенос, отвечающий разности температур потока и пленки конденсата. На стороне охлаждающей воды имеется только конвективный теплообмен. Учитывается тепловое сопротивление стенок, а также пленки конденсата. Пленка конденсата получается очень тонкой (не более 0,02–0,03 мм), и ее тепловое сопротивление в условиях рассматриваемой задачи невелико.

При расчетах конденсатор разбивался на узкие зоны (шаги) начиная со стороны подачи воздуха — сверху.

Для каждой зоны проводилось решение указанных выше дифференциальных уравнений. Полученные соотношения использовались в программе для численного расчета всех величин, характеризующих работу конденсатора в данной зоне. Результаты расчета принимались как начальные для следующей зоны.

Внутри каждой зоны для уточнения расчета выполнялось необходимое число итераций. Подобный расчет продолжался до выходной зоны.

При изменении длины зон (шагов) от 2 до 20 мм конечные результаты расчета конденсатора практически не отличались.

Теплофизические и термодинамические свойства пресной воды и пара, морской воды и воздуха в программе определялись по работам [4–6].

Проведенные расчеты, выполненные в предположении образования на вертикальных пластинах (плоские стенки) конденсатора сплошной пленки пресной воды, в общем показывают достаточную работоспособность осушителя воздуха — определяющего элемента оросительной установки рассматриваемого типа.

Однако имеются опытные данные [7, 8], показывающие, что конденсация водяного пара из потока влажного воздуха внутри горизонтальных охлаждаемых снаружи плоских или цилиндрических латунных и стеклянных каналов может

носить капельный характер. При скоростях воздуха более 5 м/с капли могут срываться потоком со стенок и дробиться.

Необходимо отметить, что даже в случае капельной конденсации (в конденсаторе рассматриваемого типа) будут обеспечиваться значения парциального давления пара, отвечающие насыщению при температуре стенок. Таким образом будет обеспечен подвод пара к поверхности. Если на стороне выхода осущенного воздуха будет организовано улавливание сорванных капель конденсата, то конденсатор будет работать в условиях, не сильно отличающихся от расчетных.

В расчетах пока не учитывалось влияние начальных участков каналов. Реально при учете начальных участков коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи будут несколько выше, что пойдет в запас расчета.

Расчеты проводились для нескольких значений относительной влажности воздуха на входе в аппарат, геометрических размеров каналов, расходов воздуха и воды. Во всем исследованном диапазоне расходных параметров теплоносителей режим течения воздуха был турбулентным, а морской воды — ламинарным.

В таблице приведены результаты расчетов для трех характерных режимов работы конденсатора с плоскими каналами.

Набирая достаточно большое количество каналов в одном аппарате (порядка нескольких десятков и сотен), можно обеспечить заданную производительность установки.

На рис. 2–4 приведены расчетные кривые распределения по длине канала влагосодержания воздуха, температур воздуха, стенки и охлаждающей воды, парциальных давлений пара в потоке и у поверхности пленки для варианта 70 %-й относительной влажности на входе.

Разработанная программа позволяет определять локальные характеристики не только пластинчатых, но и кожухотрубных конденсаторов, что может быть необходимо при выборе оптимальных конструкций конкретного назначения.

Следует заметить, что при полном тепловом расчете оросительной установки, т. е. при включении в расчет процессов изменения параметров теплоносителей при увлажнении воздуха и его подогреве в солнечном нагревателе, необходима увязка (балансирование) расходов

**Результаты расчетов конденсации**

Параметры	Значения параметров при относительной влажности воздуха на входе		
	40 %	50 %	70 %
Расход сухого воздуха, кг/час	85,0	85,0	85,0
Расход пара на входе, кг/час	12,24	16,23	25,9
Температура воздуха на входе, °С	80,0	80,0	80,0
Температура воздуха на выходе, °С	68,8	69,9	72,9
Расход охлаждающей воды, кг/час	95,0	95,0	95,0
Температура охлаждающей воды на входе, °С	25,0	25,0	25,0
Температура охлаждающей воды на выходе, °С	45,5	49,9	60,1
Относительная влажность воздуха на выходе, %	53,1	63,4	81,0
Зазор канала по воздуху, мм	50	50	50
Зазор канала по воде, мм	3	3	3
Концентрация солей в охлаждающей воде, г/кг	35	35	35
Скорость воздуха на входе, м/с	5,8	6,23	7,0
Скорость охлаждающей воды на входе, м/с	0,086	0,086	0,086
Выход опресненного конденсата, кг/час	2,24	3,41	5,15

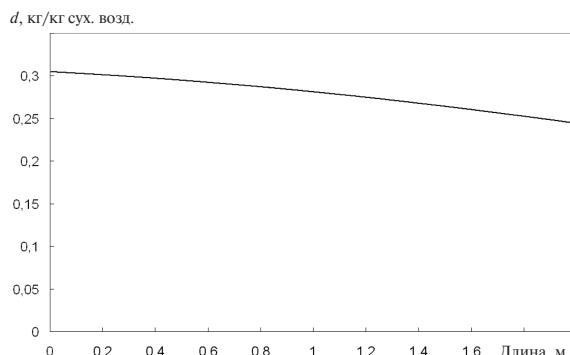


Рис. 2. Влагосодержание  $d$  воздуха по длине каналов конденсатора

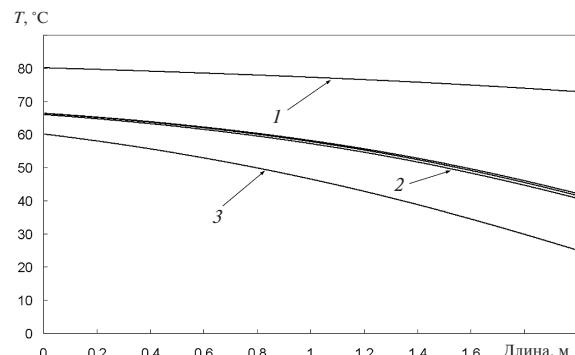


Рис. 3. Распределение температур по длине каналов конденсатора (1 — воздух; 2 — стенки канала и поверхность пленки; 3 — охлаждающая вода)

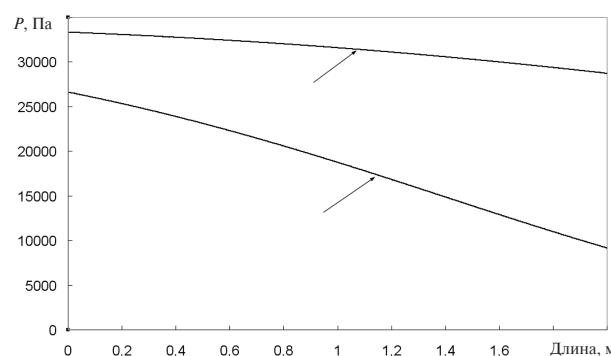


Рис. 4. Распределение парциального давления пара по длине каналов конденсатора (1 — в ядре потока воздуха; 2 — у поверхности пленки конденсата)



получаемого в увлажнителе, перегреваемого в нагревателе и конденсируемого пара. Такая увязка должна быть сделана при выборе и ра-

счете конструкций всех аппаратов, участвующих в цикле установки. Она является задачей наших дальнейших исследований и разработок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Govindan, P.N.** Status of humidification dehumidification desalination technology [Текст] / Govindan P.N., McGovern R.K., Thiel G.P. [et al.] // Proc. of World Intern. Desalination Association (IDA) Congress.— Perth, Western Australia.— September 4–9, 2011.— 20 р.
2. **Арефьев, К.М.** Определение коэффициента диффузии паров кадмия и магния в газах методом Стефана [Текст] / К.М. Арефьев, М.А. Гусева, Б.М. Хомченков // Теплофизика высоких температур.— 1987. Т. 25. № 2.— С. 250–255.
3. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент [Текст]: Справочник / Под общ. ред. чл.-корр. АН СССР В.А. Григорьева, В.М. Зорина.— 2-е изд., перераб.— М: Энергоатомиздат, 1988.— 560 с.
4. **Александров, А.А.** Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара [Текст]: Справочник / А.А. Александров, Б.А. Григорьев.— М.: Изд-во МЭИ, 1999.— 168 с.
5. **Sharqawy, M. H.** The thermophysical properties of seawater: A review of existing correlations and data [Текст] / M.H. Sharqawy, J.H. Lienhard, S.M. Zubair // Desalination and Water Treatment.— 2010. Vol. 16.— P.354–380.
6. **Бурцев, С.Н.** Влажный воздух. Состав и свойства [Текст]: Учеб. пособие / С.Н. Бурцев, Ю.Н. Цветков.— СПб.: Изд-во СПбГАХПТ, 1998.— 146 с.
7. **Бакластов, А.М.** Тепло- и массоотдача при конденсации пара из влажного воздуха [Текст] / А.М. Бакластов, Ж.Ф. Сергазин // Известия вузов. Энергетика. 1965. № 2.— С. 59–64.
8. **Смольский, Б.М.** Тепло- и массообмен при конденсации водяного пара из влажного воздуха в узких каналах [Текст] / Б.М. Смольский, П.А. Новиков, Л.А. Щербаков // Инженерно-физический журнал.— 1971. Т. XXI. № 1.— С. 71–74.

УДК 532.527

*P.P. Усманова*

## РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ РАЦИОНАЛЬНОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ АППАРАТОВ ГАЗООЧИСТКИ

Проблема очистки газовых выбросов от мелкодисперсной примеси — одна из актуальных в газоочистке и давно выдвинута на первый план экспериментальных и теоретических исследований.

Один из наиболее перспективных методов повышения эффективности пылеулавливания мелкодисперсных частиц — мокрая очистка. Для этого метода характерны сложные массообменные процессы в ходе взаимодействия газодисперсного потока с каплями орошающей жидкости, в результате чего изменяются скорость и концентрация фаз, определяющие газоочистку.

Имеющиеся исследования в данной области показывают сильную чувствительность выходных характеристик к режиму и конструкции аппарата, что свидетельствует о качественно различной ги-

дродинамике потоков при разных значениях режимно-конструктивных параметров.

Таким образом, систематизированное рассмотрение гидродинамики и эффективности работы вихревых аппаратов, получение и обобщение зависимостей между режимно-конструктивными параметрами аппарата, создание эффективных и технологичных конструкций, освоение их серийного выпуска для широкого внедрения в промышленную практику — весьма актуальны.

### Разработка конструкции барботажно-вихревого аппарата с регулируемыми лопастями

Для оптимизации барботажно-вихревого аппарата были проведены экспериментальные исследования. Эксперименты проводились по



единой методике [2] сравнительных испытаний пылеуловителей на барботажно-вихревом аппарате с цилиндрической камерой длиной 0,6 м и диаметром 0,2 и 0,4 м. Барботажно-вихревой аппарат с регулируемыми лопастями (рис. 1) содержит цилиндрическую камеру 1 с входной трубой 2. В цилиндрической камере 1 установлен завихритель 3 газового потока, представляющий собой четыре лопасти, изогнутые по синусоидальной кривой. Регулировка положения лопастей 2 выполняется путем поворота эксцентриков, скрепленных с цилиндрической камерой 1 посредством пружинных шайб и контргаек [1].

Перед завихрителем газового потока установлена центральная форсунка 4, а после завихрителя расположены периферийные форсунки 5, в которые подается орошающая жидкость. Отвод дисперсных частиц производится по трубе перетока шлама 6 в шламосборник 7.

Барботажно-вихревой аппарат с регулируемыми лопастями работает следующим образом: запыленный газ подается в цилиндрическую камеру 1, где завихритель 3 при помощи лопастей, закрепленных в радиальных пазах стержня, отклоняет поток и придает ему вращательное движение. Под действием возникающей при этом центробежной силы дисперсные частицы перемещаются к стенкам аппарата. Для регули-

рования положения лопастей на входе и выходе каждой лопасти 3 предусмотрены два выступа, посредством которых лопасть находится в контакте с парой эксцентриков. Эксцентрики осуществляют поворот лопастей на входном и выходном участках цилиндрической камеры 1 в различных направлениях, благодаря чему лопасти 3 устанавливаются в положение, соответствующее наибольшей эффективности газоочистки.

#### Исследование эффективности очистки воздуха

Исследования проводились на барботажно-вихревом аппарате с цилиндрической камерой диаметрами 0,2 и 0,4 м. В качестве модельной системы были исследованы воздух и порошок талька с размером частиц  $d = 2-30$  мкм. При этом определялись общая и фракционная эффективности очистки. Исследовалось влияние на показатель эффективности очистки режимных параметров, в качестве которых служили общий расход воздуха через барботажно-вихревой аппарат, расход воды, коэффициент закрутки  $K$ .

Установлено, что с увеличением расхода воздуха происходит возрастание коэффициента очистки (рис. 2).

Определены оптимальные с энергетической точки зрения границы пропускной способности

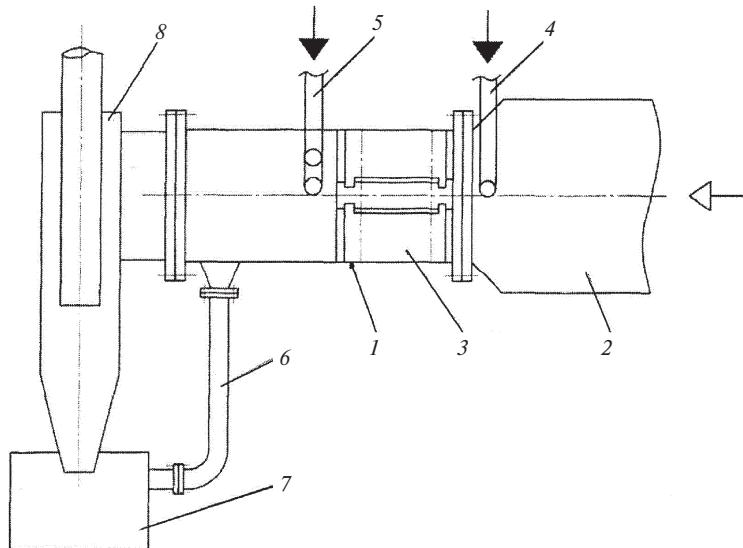


Рис.1. Схема экспериментальной установки:  
 1 — цилиндрическая камера; 2 — входная труба; 3 — завихритель;  
 4 — центральная форсунка; 5 — периферийные форсунки;  
 6 — труба перетока шлама; 7 — шламосборник; 8 — циклон

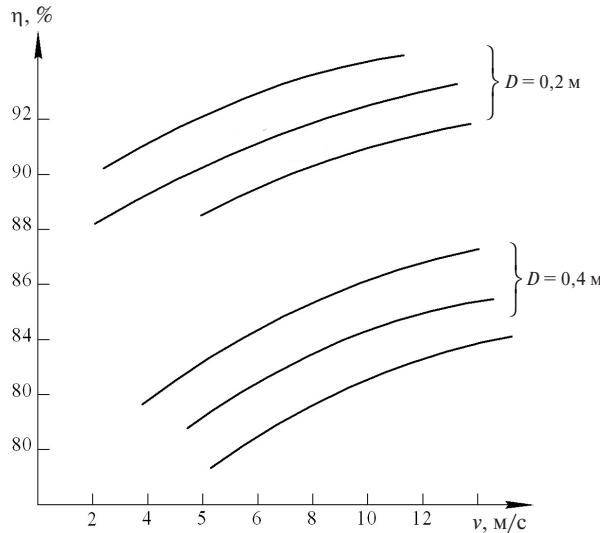


Рис. 2. Зависимости эффективности очистки от скорости газового потока. Пыль: порошок талька  $d_t = 10 \text{ мкм}$ ;  $\sigma = 3,64$ ;  $\rho_p = 2650 \text{ кг/м}^3$ ;  $z = 5 \text{ г/м}^3$

аппарата: нижний предел соответствует условной скорости в сечении 5 м/с, максимальный расход — скорости 15 м/с.

При работе барботажно-вихревого аппарата со скоростью ниже минимальной происходит снижение степени очистки, выше максимальной — резкий рост гидравлического сопротивления.

Установлено также влияние коэффициента закрутки завихрителя  $K$  на величину эффектив-

ности пылеулавливания: с ростом  $K$  степень очистки возрастает. Определен диапазон величин  $K$ , при котором обеспечивается относительно высокая эффективность улавливания частиц:  $K_{\min} = 5$ ,  $K_{\max} = 8$ . При  $K = 1$  наблюдается значительное снижение эффективности очистки; при  $K > 10$  эффективность остается практически на постоянном уровне, но потери давления в аппарате существенно возрастают. Исследовано влияние диаметра аппарата на эффективность очистки: с увеличением диаметра эффективность улавливания снижается, причем, чем меньше медианный диаметр частиц, тем больше величина падения эффективности очистки. Предложена методика расчета, единая с методикой расчета циклонов [3], по которой общая и фракционная эффективность пылеулавливания может быть определена аналитически:

$$\eta = 50 [1 + \Phi(x')], \quad (1)$$

где

$$x' = \frac{\lg \left[ \frac{d'_{50}}{d_{50} k 10^3} \sqrt{D \frac{\mu_r \vartheta}{\rho_q}} \right]}{\sqrt{\sigma^2 + \lg^2 \left( \frac{d_{50}}{d_{16}} \right)}},$$

$$\eta_{\Phi} = \frac{1}{2} [1 + \Phi(x)],$$

где

$$x = \frac{\lg \left[ \frac{d_u}{d_q k 10^3 \sqrt{D \frac{\mu_r \vartheta_r}{\rho_q}}} \right]}{\sigma},$$

$d'_{50}$  — медиана распределения частиц пыли на входе в аппарат, м;  $d_{50}$  — диаметр частиц, улавливаемых с эффективностью 50 %, м;  $\vartheta_r$  — условная скорость газа в аппарате, м/с;  $\mu_r$  — динамическая вязкость газа, Па·м/c<sup>2</sup>;  $\rho_q$  — плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $d_{16}$  — диаметр частиц на входе в аппарат, при котором масса всех частиц, имеющих размер меньше  $d_{16}$ , составляет 16 % от общей массы пыли, м;  $\sigma$  — величина, характеризующая дисперсию частиц;  $k$  — коэффициент (для данного аппарата получено  $k = 34,76$ ). При предварительных расчетах общий коэффициент очистки может быть определен графическим методом (рис. 3): используются  $c$  — функция только геометрических параметров аппарата, которая

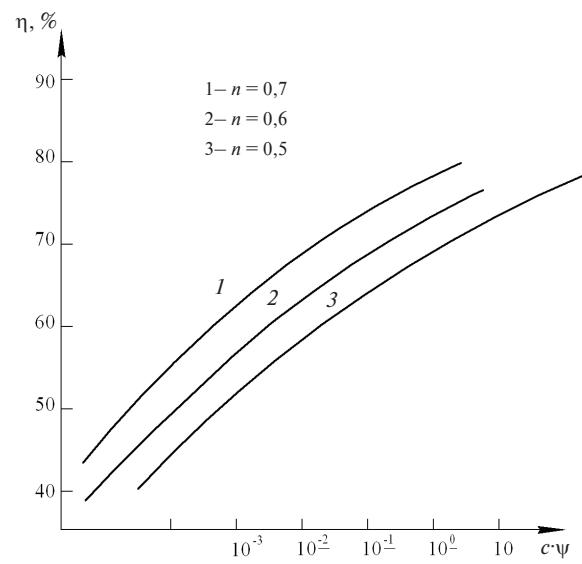


Рис. 3. Эффективность очистки газов в зависимости от произведения параметров  $c\psi$  при  $n$  равном 0,7 (1), 0,6 (2) и 0,5 (3)

может быть рассчитана для проектируемых аппаратов по известной методике [4], и  $\Psi$  — модифицированный инерционный параметр, характеризующий состояние пылегазовой смеси.

$$\Psi = \frac{d_q^2 \rho_q \vartheta_1}{18 \mu_r D} (n+1).$$

Здесь коэффициент  $n$  определяется по формуле

$$n = 1 - \left(1 - 0,0165 D^{0,15}\right) \left(\frac{T_r}{283}\right)^{0,3},$$

где  $T_r$  — абсолютная температура газа, К;  $D$  — диаметр аппарата, м.

### Исследование гидродинамических характеристик

Исследовались потери давления в барботажно-вихревом аппарате в зависимости от его режимно-конструктивных параметров.

Установлено, что наиболее эффективным и экономичным является режим работы при  $K = 5-8$  [5].

Предложена методика расчета потери давления и удельных энергозатрат на пылеулавливание, которые определяются по формулам

$$\Delta P = \xi \frac{\rho_r \vartheta^2}{2}, \text{ Па; } E = \frac{\Delta P}{3600}, \text{ кВт·ч/1000 м}^3.$$

Экспериментально установлена зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от режимных и конструктивных параметров аппарата, которая складывается из коэффициента гидравлического сопротивления «сухого» аппарата

$$\xi_{\text{сух}} = \frac{1}{n} \left( \left( \frac{R}{r} \right)^{2n} - 1 \right) + \frac{1}{k^2} \left( \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} \right)^2$$

и потерь напора на транспорт жидкости

$$\xi_{\text{тр}} = 4 \left( \frac{L}{G} \right)^{0,6} \sqrt{1 + \frac{1}{K^2}}.$$

Окончательная зависимость для расчета орошаемого барботажно-вихревого аппарата выглядит так:

$$\xi_{\text{оп}} = \frac{1}{n} \left( \left( \frac{R}{r} \right)^{2n} - 1 \right) + \frac{\varepsilon^2}{K^2} \left( 1 + \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_r} \right) \left( \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} \right)^2 +$$

$$+ 4 \left( \frac{L}{G} \right)^{0,6} \sqrt{1 + \frac{1}{K^2}}, \quad (2)$$

где  $R$  — радиус аппарата, м;  $r$  — радиус вихря, м;  $L, G$  — объемные расходы жидкости и газа,  $\text{м}^3/\text{ч.}$ ;  $\vartheta_1, \vartheta_2$  — скорость газа на входе и выходе из аппарата,  $\text{м/с.}$ ;  $\varepsilon$  — коэффициент потери закрутки потока;  $K$  — коэффициент закрутки вихрителя;  $n$  — показатель вихревого движения.

Полученная формула учитывает наличие дисперсной фазы и частичную потерю закрутки потока. Учет потерь на транспорт жидкости выполнен путем формального применения принципа аддитивности  $\xi$ .

Интенсивность закручивания газового потока оценивалась геометрическим коэффициентом закрутки  $K_r$ ,

$$K_r = \frac{32}{\pi^2} \frac{\vartheta_{\phi}}{\vartheta_x} \frac{l}{D}.$$

Поскольку значение  $K_r$  не совпадает с истинным коэффициентом закрутки, то принимается следующее соотношение:

$$K = 1,4 K_r^{0,72}.$$

Результаты опытов представлялись графическими зависимостями гидравлического сопротивления от режимно-конструктивных параметров (рис. 4 и 5).

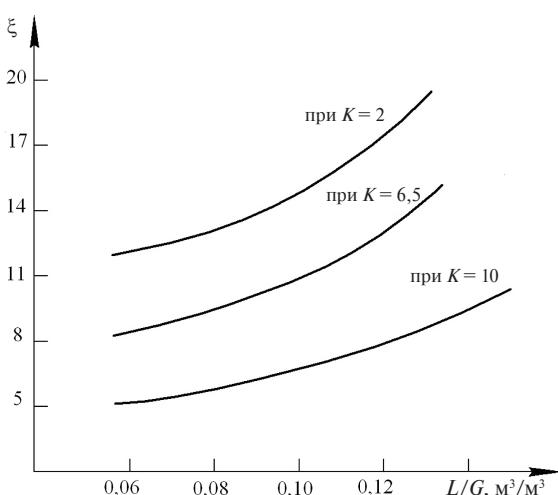


Рис. 4. Зависимость  $\xi$  от удельного орошения аппарата

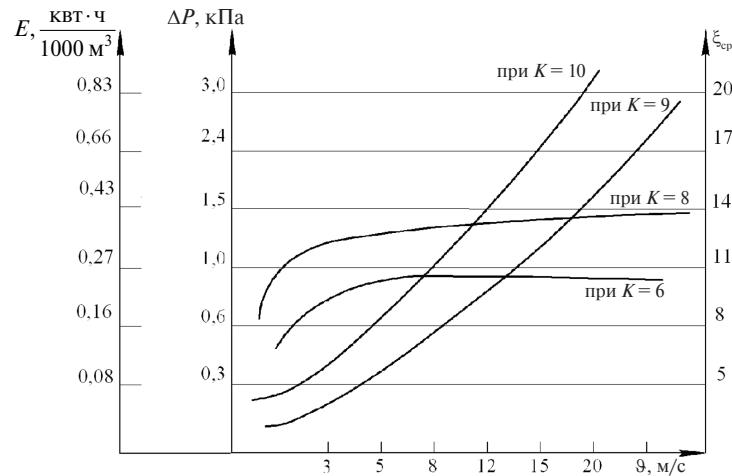


Рис. 5. Зависимость энергозатрат на пылеулавливание и гидравлического сопротивления от скорости газа в аппарате

### Расчет стоимости пылеулавливания

С помощью полученных ранее соотношений, связывающих эффективность пылеулавливания и гидравлическое сопротивление с режимно-конструктивными параметрами барботажно-вихревого аппарата, разработана методика расчета, позволяющая выбрать аппарат с такими режимными и конструктивными параметрами, при которых он бы обеспечивал требуемые технологические параметры при минимальной стоимости очистки.

Основными компонентами стоимости очистки являются стоимость пыли, не уловленной барботажно-вихревым аппаратом, ( $C_n$ ) и стоимость энергозатрат на пропускание через аппарат газового потока ( $C_e$ ).

Стоимость очистки определяется по формуле  $C_o = C_n + C_e$ .

Стоимость неуловленной пыли  $C_n$  уменьшается с ростом эффективности  $\eta$  работы аппарата, с уменьшением начальной концентрации пыли  $z_1$  и с уменьшением стоимости уловленной пыли  $C_y$ :

$$C_n = (1 - \eta) z_1 C_y.$$

Стоимость электроэнергии, затрачиваемой на пылеулавливание, возрастает с увеличением гидравлического сопротивления аппарата и рассчитывается по формуле

$$C_e = \Delta P Q r C_{te}.$$

Полное выражение для расчета стоимости очистки одного кубометра газа можно получить с учетом формулы (1) для расчета эффективности и формулы (2) для расчета гидравлического сопротивления.

Разработан метод расчета общей и фракционной эффективности пылеулавливания, учитывающий геометрические параметры аппарата.

Разработан метод расчета гидравлического сопротивления барботажно-вихревого аппарата, учитывающий конструктивные параметры захвичителя и наличие дисперсной фазы.

Полученные формулы послужили основой для разработки методики расчета барботажно-вихревого аппарата. Разработанная методика позволяет рассчитывать аппараты оптимальной геометрии, работающие в оптимальном режиме. Критерием оптимизации принята минимальная стоимость очистки единичного объема газа при обеспечении требуемой эффективности пылеулавливания.

Разработанный метод может быть использован при расчете и конструировании аппаратов газоочистки, так как составляющие его соотношения определяют связь между технологическими характеристиками пылеуловителей и их геометрическими и режимными параметрами.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Патент 2234358 РФ.** Барботажно-вихревой аппарат с регулируемыми лопастями [Текст] / Р.Р. Усманова, А.К. Панов [и др.].— Опубл. 21.02. 2004.— Бюл. № 23.
2. **Адлер, Ю.П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю.П. Адлер, Е.В. Марков, Ю.В. Грановский // М.: Наука, 1986.— 279 с.
3. **Ужов, В.Н.** Подготовка промышленных газов к очистке [Текст] / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг.— М.: Химия, 1975.— 216 с.
4. **Leith, D.** Aiche, symposium series [Текст] / D. Leith, W. Licht // Air.— 1971.— 12 p.
5. **Usmanova, R.R.** Complex aerohydrodynamic research and the efficiency of arresting particles for barbottage — rotation [Текст] / R.R. Usmanova, A.K. Panov, G.E. Zaikov // Journal of the Balkan tribological association.— 2006. № 3.— P. 368—373.

УДК 66.017

А.А. Попович, Ван Цин Шен

**ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АНОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ЛИТИЙ-ИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ,  
ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ**

Традиционным сырьем для получения материала анода литий-ионных полимерных аккумуляторов является пиролитический углерод — продукт разложения углеродсодержащих соединений. Но в настоящее время стоит актуальная задача: заменить углеводородное сырье на органическое сырье природного происхождения. Это обусловлено следующими факторами:

высокой стоимостью углеводородного сырья и сложной технологией его переработки.

повышенной токсичностью при переработке углеводородного сырья;

истощением мировых запасов традиционных энергетических ресурсов: нефти, природного газа, каменного и бурого угля;

высоким содержанием вредных и нежелательных примесей.

В середине XX века азиатскими исследователями, в частности учеными Китая и Японии, активно делались попытки заменить углеводородное сырье на органическое, то есть традиционный пиролиз углеводородов стали заменять пиролиз некоторых органических соединений: фенолформальдегидной смолы, новолачной эпоксидной смолы. Попытки по замене привнесли позитивные результаты в области электрохимических свойств анодного материала, в частности увеличили реальную интеркаляционную

емкость до 600—700 мА·ч/г. Вскоре китайскими и японскими исследователями было предложено использовать органическое сырье природного происхождения, а именно растительное сырье (сахарный тростник, бамбук, скорлупа кокосовых орехов, косточки фруктовых деревьев, кофейные зерна, отходы хлопка, шелуха риса, арахиса, сои [1—3]) и отходы его переработки

В работе [4] китайских исследователей было установлено, что анодный материал, полученный пиролизом рисовой шелухи, обладает ценным комплексом электрохимических свойств: имеет высокую интеркаляционную емкость, достигающую 1055 мА·ч/г, оптимальные для анодного материала степень графитизации, размер частиц, скорость интеркаляции-деинтеркаляции, коэффициент диффузии лития, обратимую и необратимую емкость, низкую скорость деградации, хорошую технологичность при изготовлении электродов. По мнению китайских исследователей, уникальный комплекс электрохимических свойств анодного материала обусловлен еще и тем, что в рисовой шелухе содержится кремний, который при пиролизе выступает своеобразным допантом и придает уникальные свойства анодному материалу.

Аналогичные эксперименты проводились японскими исследователями [5]. Для получения

анодного материала применяли пиролиз отходов хлопка, косточек фруктовых деревьев, кофейных зерен, сахарного тростника; такой анодный материал также имел высокие рабочие характеристики. Было установлено, что тростниковый сахар — один из самых чистых видов сырья для производства анодного материала, хотя превышает по стоимости другое растительное сырье, но ниже стоимости углеродного сырья [5].

Главными отличительными особенностями растительного сырья являются:

его чистота, т. е. отсутствие вредных примесей, которые негативно влияют на рабочие характеристики анодного материала;

экологическая приемлемость;

низкая себестоимость продукции;

простота переработки и подготовки к процессу пиролиза, возможность предварительной обработки (механоактивация и допиривание);

быстрая возобновляемость этого материала.

Работы [1–7] в области исследования и внедрения органического природного сырья растительного происхождения в настоящее время ограничены и принадлежат в основном азиатским исследователям — китайцам и японцам. Широкое промышленное применение растительного сырья для получения анодного материала практически отсутствует, но, по мнению российских и зарубежных исследователей, интерес к этой сфере остается актуальным и предпринимаются новые попытки по замене в промышленных масштабах углеводородного сырья на сырье растительного происхождения.

Исходя из вышеизложенного отметим следующие нерешенные проблемы, которые определяют направления дальнейших исследований в области разработки анодных материалов для литий-ионных (полимерных) аккумуляторов, полученных из растительного сырья:

нет достаточного представления о технологии производства анодных материалов из нетрадиционного (возобновляемого) растительного сырья;

недостаточно изучены виды растительного сырья, оптимальные для производства анодных материалов;

нет единого мнения об оптимальной микроструктуре модификаций углерода, необходимой для создания эффективных анодных матриц;

недостаточно определены параметры модификации анодных матриц различными химическими элементами;

мало изучены микроструктуры эффективных анодных матриц и механизмы интеркаляции лития в углеродные материалы;

мало изучен опыт применения углеродных наноструктур и композиционных материалов в качестве анодных матриц.

**Цели и задачи исследований.** Цель нашей работы — исследование технологии получения анодных матриц из возобновляемого растительного сырья: тростникового сахара, побегов бамбука, отходов сельскохозяйственных культур.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: установить обобщенные закономерности формирования составов, структур и свойств анодных матриц литий-ионных (полимерных) аккумуляторов, полученных из возобновляемого растительного сырья — бамбука и сахарного тростника.

В качестве исходного источника возобновляемого растительного сырья использовали сахарный тростник производства южнокитайской компании CHANGZHOUFOOD Co. Ltd и побеги бамбука (возраст 1,5 года). Фазовый состав полученных углеродных модификаций из побегов бамбука и сахарного тростника определяли методом рентгенофазового анализа на дифрактометре D8 ADVANCE (Германия) в  $\text{CuK}_\alpha$ -излучении по стандартной методике. Идентификация соединений, входящих в состав исследуемых образцов, выполнена в автоматическом режиме поиска EVA с использованием банка данных PDF-2. Форму, размер частиц, а также структуру полученных углеродных модификаций исследовали методом электронно-сканирующей микроскопии на атомно-силовом микроскопе SOLVER-PRO (ЗАО NT-MDT, Россия). Исследование удельной поверхности производили на анализаторе удельной поверхности серии Сорбтметр—М (ЗАО «КАТАКОН», г. Новосибирск), значение удельной поверхности устанавливали по термодесорбции азота. Зольность полученных углеродных модификаций определяли по стандартной методике, навески (углеродные модификации) сжигали в керамическом тигле на открытом воздухе при температуре 1000 °C до появления несгораемого мине-



рального остатка. Насыпную и физическую плотность определяли по стандартным методикам, для определения физической плотности использовали толуол. Эксперименты по тестированию аккумуляторов проводили в г. Вехай, КНР, на предприятии «TSE».

Получение и модифицирование анодных матриц для литий-ионных (полимерных) аккумуляторов из возобновляемого растительного сырья проводили на специально сконструированной установке по технологии, описанной в работе [8]. Полученные структуры исследовали на атомно-силовом микроскопе.

В составе полученных углеродных модификаций наблюдаются частицы овальной формы со слоистой структурой (рис. 1, 2), напоминающие слоистые структуры графита. Полученные углеродные модификации имеют смешанную структуру, т. е. присутствует как аморфная, так и кристаллическая фазы, что подтверждают дан-

ные рентгенофазового анализа. Результаты исследований удельной поверхности порошка и структуры поверхности частиц представлены в табл. 1, 2.

Представленные результаты позволяют говорить о том, что полученные углеродные порошки имеют высокоразвитые поверхности и могут быть эффективными анодными матрицами для литий-ионных (полимерных) аккумуляторов. Величины насыпной и физической плотности, а также зольности полученных модификаций углерода близки величинам коммерческих анодных материалов (см. табл. 2).

### Основные результаты работы

На экспериментальной установке получены и модифицированы анодные матрицы для литий-ионных (полимерных) аккумуляторов из возобновляемого растительного сырья: побегов бамбука и тростникового сахара.

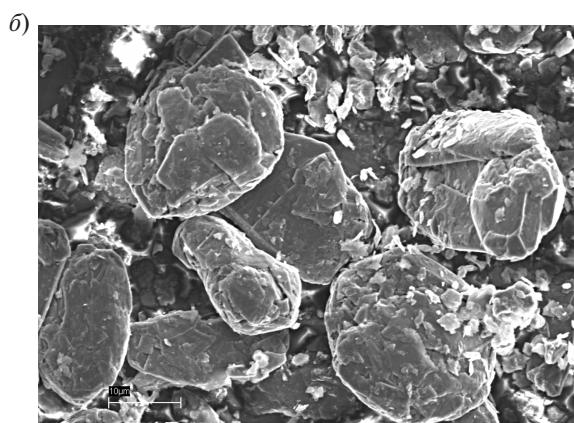
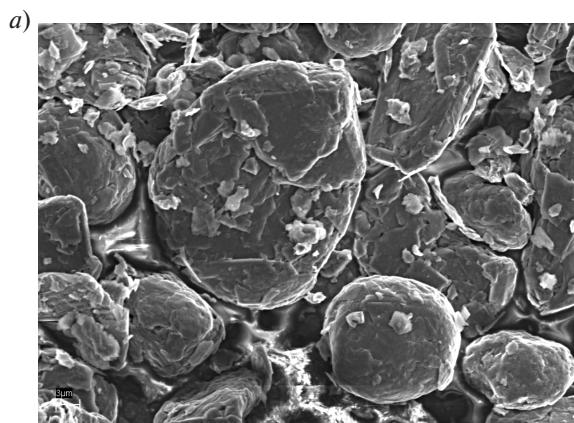


Рис. 1. Морфология модификации углерода, полученной из сахарного тростника при температуре 900 (а) и 1150 (б) °С

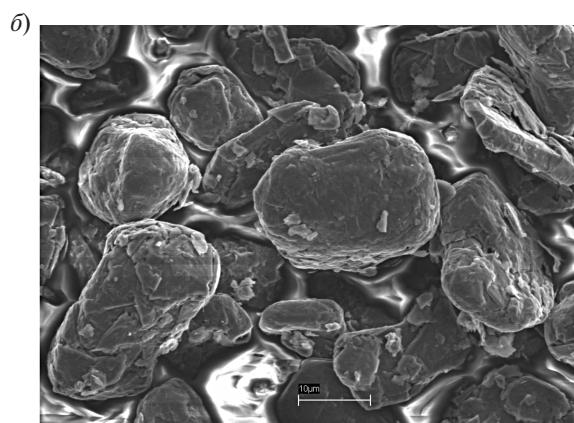
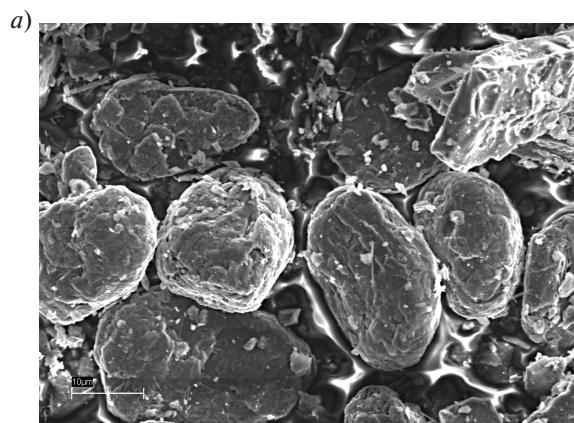


Рис. 2. Морфология модификации углерода, полученной из побегов бамбука при температуре 900 (а) и 1150 (б) °С

Таблица 1

Удельная поверхность модификации углерода, полученной из растительного сырья при различных температурах

Исходное сырье	Температура получения, °C	Удельная площадь поверхности, м <sup>2</sup> /г	Удельный объем пор по предельному заполнению, см <sup>3</sup> /г	Средний размер пор, нм 4V/A
Побеги бамбука	900	142,383	0,06170	2,0671
	1150	188,338	0,0750	0,7041
Тростниковый сахар	900	195,745	0,0810	0,6984
	1150	197,471	0,0843	0,7318

Таблица 2

Характеристики предельно-допустимых и оптимальных показателей анодного материала, полученного из растительного сырья при различных температурах

Свойства	Единица измерения	Значения показателей для анодного материала					
		из побегов бамбука			из тростникового сахара		
		Предельный показатель	Оптимальный показатель		Предельный показатель	Оптимальный показатель	
			при 900 °C	при 1150 °C		при 900 °C	при 1150 °C
Размер частиц, D50	мкм	12~25	14,11	14,07	12~25	14,06	14,02
Физическая плотность	г/см <sup>3</sup>	≥2,13	2,23	2,23	≥2,23	2,33	2,27
Насыпная плотность	г/см <sup>3</sup>	≥1,29	1,41	1,33	≥1,27	1,39	1,34
Зольность	%	≤0,23	0,083	0,082	≤0,23	0,087	0,081
Площадь поверхности	м <sup>2</sup> /г	≤3,4	2,3	2,8	≤3,6	2,6	2,4
Начальная разрядная способность	мА·ч/г	≥339	347,4	344,4	≥335	342,4	352,4
Начальная разрядная эффективность	%	≥91,0	91,6	93,8	≥94,0	94,4	98,3



Экспериментально установлены процентные соотношения эффективного модифицирования анодных матриц.

С помощью современных методов электронно-сканирующей микроскопии и рентгенофазового анализа выявлены особенности структуры полученных анодных матриц.

Достигнуты прекрасные физико-химические и технологические характеристики полученных анодных матриц: высокая удельная поверхность порошков, высокая насыпная и физическая плотности, низкая зольность, хорошая обрабатываемость анода. Они близки по значению характеристикам коммерческих анодных матриц.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cullis, C.F. Factors affecting the structure and properties of pyrolytic carbon [Текст] / C.F. Cullis // Petroleum Derived Carbons.— Ed. M.L. Deviney, T.M. Grady / American Chemical Society. ACS Symposium Series.— Washington.— 1976. Vol. 21.— P. 228–236.
2. Alamgic, M. The Behavior of Carbon Electrodes Derived from Poly(p-phenylene) in Polyacrylonitrile-Based Polymer Electrolyte Cells / M. Alamgic, Q. Zuo, K.M. Abraham // J. Electrochem. Soc.— 1995. Vol. 141.— P. 143.
3. Xue, J.S. Dramatic Effect of Oxidation on Lithium Insertion in Carbons Made from Epoxy Resins [Текст] / J.S. Xue, J.R. Dahn // J. Electrochem. Soc.— 1995. Vol. 142. P. 3668.
4. Zheng, T. High-Capacity Carbons Prepared from Phenolic Resin for Anodes of Lithium-Ion Batteries [Текст] / T. Zheng, Q. Zhong, J.R. Dahn // J. Electro-
- chem. Soc.— 1995. Vol. 142.— P. 211.
5. Tokumitsu, K. Charge/discharge characteristics of synthetic carbon anode for lithium secondary battery [Текст] / K. Tokumitsu, A. Mabuchi, H. Fujimoto, T. Katsuh // J. Power Sources. 1995. Vol. 54.— P. 444.
6. Sato, U. A Mechanism of Lithium Storage in Disordered Carbons [Текст] / U. Sato, M. Noguchi, A. Deuichi [et al] // J. Science. 1995 Vol. 264.— P. 556.
7. Fey George Ting-Kuo, Chen Chung-Lai. Preparation and electrochemical properties of lithium–sulfur polymer batteries [Текст] / F. G. Ting-Kuo, C. Chung-Lai // J. Power Sources. 2001. P. 97–98.
8. Попович, А.А. Получение анодных материалов из растительного сырья для литий-ионных (полимерных) аккумуляторов [Текст] / А.А. Попович, Д.В. Онищенко // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.— 2009. № 1.— С. 14–17.

УДК 543.426:539.16.04:556.53

А.В. Кулаков

## ОБРАЗОВАНИЕ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ СОЛЕЙ УРАНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Интенсификация промышленного производства во второй половине XX века привела к появлению на планете большой группы антропогенных радионуклидов. Их суммарная активность в среднем соизмерима с активностью естественного радиоактивного фона, но на некоторых участках (зоны техногенно-повышенного радиоактивного фона) может существенно превышать его [1].

Антропогенные радионуклиды можно разделить на две основные группы: искусственные радионуклиды, получаемые в результате ядерных реакций, и естественные, или природные, ради-

онуклиды (уран, торий и продукты их распада), концентрация которых на земной поверхности резко возросла за счет технологических процессов, связанных с перемещением их из более глубоких зон земной коры (например, при добыче урана). Это деление условно, поскольку образующиеся в естественных условиях легкие радионуклиды могут быть получены и искусственным путем. Так, тритий образуется в окружающей среде в результате ядерных реакций химических элементов с космическим излучением и в реакциях, искусственно вызванных делением или синтезом ядер. Строниций-90 также возникает



в окружающей среде при спонтанном делении урана-238, но может быть получен и искусственно [1]. Таким образом, радиоактивное загрязнение биосфера представляет собой увеличение концентрации радиоактивных веществ в живых организмах и среде их обитания (атмосфера, гидросфера, почва) в результате деятельности человека.

Искусственные радионуклиды не свойственны биосфере, они появились лишь с середины XX века в результате развития ядерных технологий военного и гражданского применения. Радиоактивные вещества, образующиеся в результате ядерного взрыва, представлены в основном продуктами деления урана-238 и плутония-239, невыгоревшим ядерным топливом и материалами с наведенной активностью. В зависимости от времени, прошедшего с момента взрыва до оседания частиц на земную поверхность, радиоактивные выпадения делятся на три вида:

1. Ближние, или локальные, выпадения представлены относительно крупными (более 100 мкм) частицами, оседающими на землю преимущественно под действием силы тяжести. Локальные выпадения начинаются сразу после взрыва и продолжаются в течение последующих 1–2 суток, охватывая по мере переноса радиоактивного облака ветром все более обширную территорию. В результате локальных выпадений на земной поверхности образуется радиоактивный след шириной в несколько десятков и протяженностью в несколько сот километров. Крупные частицы, оседающие под действием сил тяжести, попадают непосредственно на земную поверхность, в т. ч. на растительность и животных, обусловливая их поверхностное загрязнение. Считается, что при наземных ядерных взрывах мегатонной мощности на ближние выпадения приходится до 80 , а при атмосферных — около 10 %.

2. Промежуточные, или тропосферные, выпадения представлены мелкими частицами (несколько микрометров и менее). Эти частицы формируются в тропосфере, ниже тропопаузы, на высоте 11–16 км. Период полувыведения этих частиц из тропосферы составляет 20–30 суток. На тропосферные выпадения при наземных взрывах мегатонной мощности приходится 5 %.

3. Глобальные, или стратосферные, выпадения состоят из частиц от нескольких сотых до десятых долей микрометра, забрасываемых в стратосферу на высоту 10–30 км. Оттуда они переносятся в тропосферу струйными течениями и циклональными вихрями либо с воздушными массами через разрывы в тропопаузе.

В умеренных широтах глобальные выпадения с атмосферными осадками (влажные выпадения) составляют 60–70 % общей суммы радиоактивных выпадений, остальная их часть (30–40 %) представлена сухими выпадениями. Глобальные выпадения распределяются по всей поверхности земного шара.

Из глобальных выпадений в водный раствор переходит около 50 % общего количества радионуклидов, причем в водонерастворимой форме поступает до 95 % стронция-90 и до 70 % цезия-137, в растворимой форме — 30 % церия-144 и 40 % циркония-95. Из локальных и тропосферных выпадений от атмосферных взрывов, представленных частицами величиной до 20 мкм, в воде растворяется до 30 % (в основном, это радионуклиды йода, цезия, стронция, бария).

Количество образованных при ядерных взрывах радиоактивных изотопов, включающихся в пищевые цепочки, определяется не только тем, сколько их выпало из воздуха, но также структурой экосистемы и особенностями биохимических циклов [1, 2]. В целом в малопродуктивных местообитаниях значительная доля осадков включается в пищевые цепочки. В экосистемах с высокой продуктивностью интенсивность обмена веществ и большая сорбирующая емкость почвы или донных отложений обеспечивают такое разбавление осадков, что в растения они попадают в относительно небольшом количестве. Выпавшие радиоактивные осадки (особенно стронций-90 и цезий-137) доходят по пищевой цепочке до человека, но их содержание в тканях организма человека никогда не бывает таким высоким, как в тканях животных.

В результате работы реакторов накапливаются продукты деления ядерного топлива, продукты нейтронной активации и остатки выгоревшего топлива. Продукты деления образуются преимущественно внутри тепловыделяющих элементов (твэлов) и там остаются. Выход за пределы оболочки твэлов ничтожно мал для всех



радионуклидов, кроме трития (через оболочки из нержавеющей стали проникает около 80 % трития). В состав продуктов деления входят также благородные газы, летучие и нелетучие вещества. Все они являются бета- и гамма-излучателями и имеют периоды полураспада от долей секунды до десятков лет. Среди продуктов нейтронной активации также присутствуют радионуклиды различного состава и продолжительности жизни. Отработанные твэлы выдерживают на территории АЭС в специальных бассейнах для распада короткоживущих радионуклидов, а затем отправляют на радиохимические заводы для переработки.

При нормальной работе АЭС поступление радионуклидов во внешнюю среду незначительно. Загрязнение окружающей среды в результате работы радиохимических заводов гораздо серьезнее. Значительный вклад в глобальное загрязнение биосфера предприятиями ядерного топливного цикла (ЯТЦ) вносят углерод-14, криптон-85, тритий и йод-129. Другие долгоживущие негазообразные радионуклиды (стронций-90, цезий-137, изотопы трансурановых элементов), поступающие в окружающую среду с выбросами предприятий ЯТЦ, рассеиваются на ограниченной территории, т. е. создают локальное загрязнение [1–3].

Помимо «плановых» выбросов, источником радиоактивного загрязнения окружающей среды являются аварии на ядерных реакторах. Основную опасность при этом представляют продукты деления и нейтронной активации, накопившиеся в активной зоне реактора. Условием их сохранения внутри твэлов является герметичность и достаточное охлаждение твэлов и кожуха. Перегрев топлива и оплавление активной зоны реактора могут произойти лишь в том случае, если количество тепловой энергии, выделяемой в процессе ядерной реакции, превысит величину, снимаемую теплоносителем. Тогда теплоноситель переходит в пар, который вместе с облаком газообразных продуктов деления может привести к избыточному давлению и взрыву.

Таким образом, при разрушении реактора АЭС продукты деления урана и нейтронной активации вместе с неразделившимся (невыгоревшим) топливом поступают во внешнюю среду и вызывают радиоактивное загрязнение терри-

тории, площадь которой зависит от мощности взрыва и метеорологических условий.

Уран относится к общеклеточным ядам, поражая все органы и ткани, его действие обусловлено химической токсичностью и радиоактивностью. ПДК для растворимых соединений урана составляет 0,015 мг/м<sup>3</sup>, для растворимых — 0,075 мг/м<sup>3</sup>. Все изотопы урана являются ядовитыми, тератогенными и радиоактивными [3].

Уран, как известно, испускает  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучение. Наиболее опасным является  $\alpha$ -излучение, так как задерживается клеточными тканями и приводит к изменениям на клеточном уровне.

В основной части уран поступает в организм человека в виде растворимых солей уранила  $\text{UO}_2^{2+}$  из природных водоемов через пищу и воду; через кожные покровы транспорт урана полностью блокируется. Это определяет необходимость создания простого в проведении экспрессного контроля соединений урана в природных водах, особенно при авариях на АЭС и объектах, содержащих жидкие радиоактивные отходы.

Для определения малых концентраций солей урана ( $10^{-5}$ – $10^{-6}$  г/л) в природных водах наиболее широко используются экстракционно-люминесцентный и фотометрический методы [3].

Экстракционно-люминесцентный метод определения урана в воде основан на предварительном экстрагировании урана дизоамиловым эфиром метилфосфоновой кислоты в гидрированном керосине и последующем анализе экстракта люминесцентным методом. Фотометрический метод определения содержания урана основан на его выделении и концентрировании на осадке роданида кристалл-виолета с последующим взаимодействием его с арсеназо (III).

Данные методы позволяют осуществлять экспрессное определение малых содержаний урана в растворах после их очистки от примесных соединений. Недостатком является невозможность использования указанных методов в полевых условиях из-за аппаратурной и методической сложности.

В последнее время для определения микр концентраций урана (до  $10^{-6}$  г/л) широко используются различные виды активационного анализа [4], особенно метод ядерных треков [5].

В работе [6] описывается метод анализа природных вод на содержание урана с использова-



нием активационного метода. Исследуемая проба воды выпаривается под инфракрасной лампой, помещается в кварцевые ампулы и облучается потоком нейтронов около  $3 \cdot 10^{13}$  нейтр/( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ). Продолжительность облучения колеблется от нескольких часов до трех недель. После облучения пробу подвергают химической обработке для определения ( $n, \gamma$ ) продуктов излучения, которые измеряют и сравнивают со стандартом. Чувствительность метода обнаружения урана составляет порядка  $2 \cdot 10^{-9}$  г/л. Данный метод позволяет определять уран и торий в присутствии  $^{239}\text{Np}$  и  $^{233}\text{Ra}$ . Однако химическая обработка облученных проб по отделению протактиния и нептуния сложна, поскольку для определения урана рекомендуется использовать метод непосредственного счета треков деления в оптическом микроскопе.

В работе [7] предложена методика определения урана в природных водах по облучению сухого остатка потоком нейтронов после выделения его из объекта исследования пропусканием анализируемой пробы через ионит (Dowex 1 $\times$ 8) с последующим выпариванием элюата. Содержание урана определяют по плотности треков деления.

Методы определения содержания урана по запаздывающим нейтронам приведены в работе [8]. Стандарт и взвешенную пробу в полиэтиленовых капсулах облучают потоком нейтронов плотностью около  $10^{12}$  нейтр/( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ) в пневматической системе в течение 1 мин, выдерживают 30 с и проводят радиометрическое измерение нейтронным счетчиком. Активность пробы сравнивают со стандартом. Относительная погрешность определения  $^{238}\text{U}$  по трекам продуктов деления  $^{235}\text{U}$  составляет не более  $\pm 10\%$ , а чувствительность метода —  $10^{-10}$  г/л.

Таким образом, существующие методы анализа воды на наличие в ней солей урана — достаточно сложны и не позволяют осуществлять экспрессный контроль радиоактивных загрязнений природных вод. В то же время в большинстве случаев, особенно при технологических выбросах, необходимо быстрое определение «*in situ*» состояния радиоактивного загрязнения с идентификацией уранилов в объектах окружающей среды с целью принятия оперативного решения по ликвидации последствий для недопущения распространения радионуклидов на

значительные территории. Для решения подобных задач необходимо использование высокочувствительных экспрессных методов обнаружения солей урана в окружающей среде, позволяющих проводить экологический контроль непосредственно на месте аварии.

Известно [8], что при сильном радиоактивном загрязнении воды в ней образуется перекись водорода. Радиохимический канал образования перекиси водорода конкурирует с процессами каталитической наработки активных форм кислорода (АФК) ионами металлов переменной валентности, что приводит к необходимости изучения их конкурирующей способности при создании методики обнаружения уранилов в природных водах по самоиндукции перекиси водорода.

В работах [2, 8, 9] обосновывается теоретическая возможность использования хемилюминесцентных радиочувствительных материалов на основе штатного модифицированного комплекта индикаторных средств КИС СП для количественного определения перекиси водорода, образующейся в результате радиолиза воды под действием  $\alpha$ -излучения радионуклидов уранового ряда с помощью анализатора жидких проб ЛИК-2.

Как было показано в работах [8, 9], при наличии в воде солей металлов переменной валентности под действием геомагнитного поля Земли происходит наработка  $\text{HO}_2^{(-*)}$ -ион-радикалов. Было выдвинуто предположение, что подобное явление обусловлено действием электромагнитных полей низкой интенсивности на электронную компоненту связанных состояний воды, в которых ионы металлов переменной валентности способны к обменным взаимодействиям. Было проведено изучение процессов генерации активных форм кислорода в водных растворах солей металлов переменной валентности под влиянием искусственно наведенных электромагнитных полей низкой интенсивности.

Оценка влияния синусоидальных электромагнитных полей на генерацию активных кислородных форм в водных растворах металлов переменной валентности осуществлялась по содержанию пергидроксильного ион-радикала  $\text{HO}_2^{(-*)}$  в водном растворе сульфата уранила концентрацией  $7,56 \cdot 10^{-4}$  моль/л при  $pH = 2,50$ . В ка-

честве источника генерации синусоидальных электромагнитных полей использовался генератор высокочастотных сигналов Г4–117.

Определение содержания пергидроксильного ион-радикала  $\text{HO}_2^{(*)}$  в обработанных и необработанных электрическим полем растворах проводилось попеременно. При этом контрольный раствор постоянно находился в металлическом заземленном кожухе для исключения воздействия наведенных электрических и магнитных полей генератора. Обрабатываемый раствор сульфата уранила помещался в металлический заземленный корпус с монтированным конденсатором для формирования переменного электрического поля и катушкой, создающей магнитное поле (рис. 1). Анализ содержания пергидроксильного ион-радикала  $\text{HO}_2^{(*)}$  проводился на анализаторе «ЛИК-2», корпус которого также заземлялся для исключения влияния внешних полей на реактив, находящийся в ячейке прибора.

Исследования проводились на частотах в интервале 100 Гц – 100 кГц при выходном напряжении 0,3 и 3 В. В качестве источника магнитного поля использовалась катушка из медной проволоки с сопротивлением 62,5 Ом, а электрического поля – конденсатор с параллельным сопротивлением 1,1 кОм.

Из проведенных исследований следует, что под действием переменного магнитного и элек-

трического полей в водном растворе сульфата уранила происходит подавление генерации АФК. При этом генерация  $\text{HO}_2^{(*)}$  имеет осциллирующий характер, что обуславливается обменными процессами в ион-кристаллических ассоциатах воды.

На рис. 2 представлена зависимость нормированной интенсивности хемилюминесценции (облученного водного раствора сульфата уранила к необлученному) от времени воздействия магнитного поля с частотой 20 Гц и выходным напряжением 3 В. На данной зависимости четко прослеживается волновой характер и подавление магнитным полем генерации перекиси водорода в водном растворе сульфата уранила. Подобный характер зависимости обусловлен замедлением энергетической накачки ассоциата с последующим резким выбросом накопленной энергии в виде свободно-радикальных форм кислорода. После освобождения ассоциата от избыточной энергии этот процесс повторяется.

Влияние магнитных полей килогерцового диапазона на процесс генерации  $\text{HO}_2^{(*)}$ -ион-радикалов хорошо прослеживается по кинетической зависимости нормированной амплитуды хемилюминесцентного пика, полученной в магнитном поле при частоте 20 кГц (рис. 3). Как следует из зависимости, воздействие магнитно-

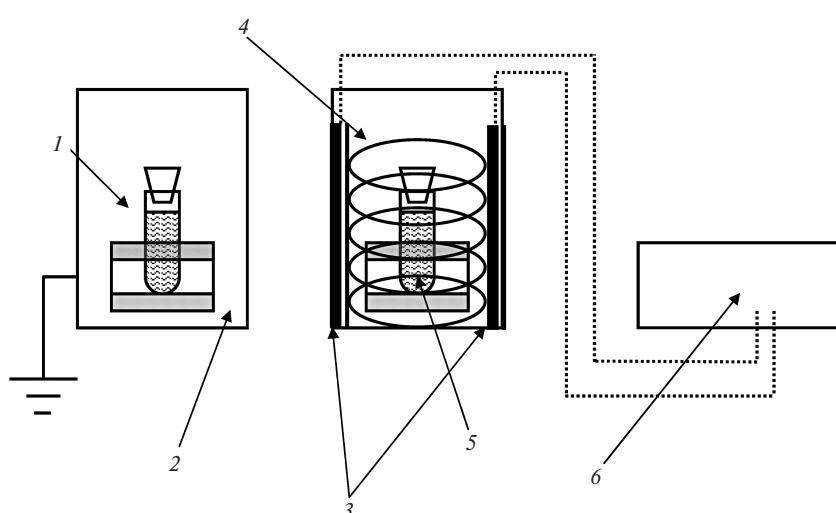


Рис. 1. Установка для исследования воздействия синусоидальных магнитных и электрических полей на водный раствор сульфата уранила:

1 – контрольный раствор  $\text{UO}_2\text{SO}_4$ ; 2 – металлический кожух с заземлением; 3 – обкладки конденсатора; 4 – катушка; 5 – пробирка с облучаемым раствором  $\text{UO}_2\text{SO}_4$ ; 6 – генератор синусоидальных сигналов

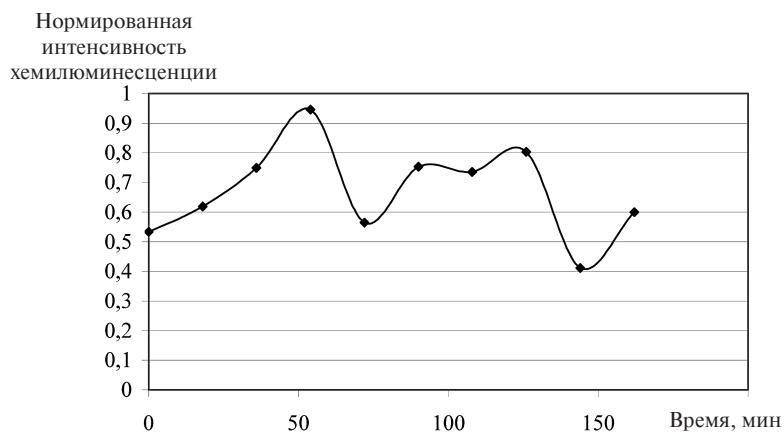


Рис. 2. Зависимость нормированной интенсивности хемилюминесценции ( $\text{Am}$  облученного/ $\text{Am}$  контрольного раствора) от времени после облучения водного раствора сульфата уранила концентрации  $7,56 \cdot 10^{-4}$  моль/л при воздействии переменным магнитным полем частотой 20 Гц и плотности магнитного потока 0,78 мкТл

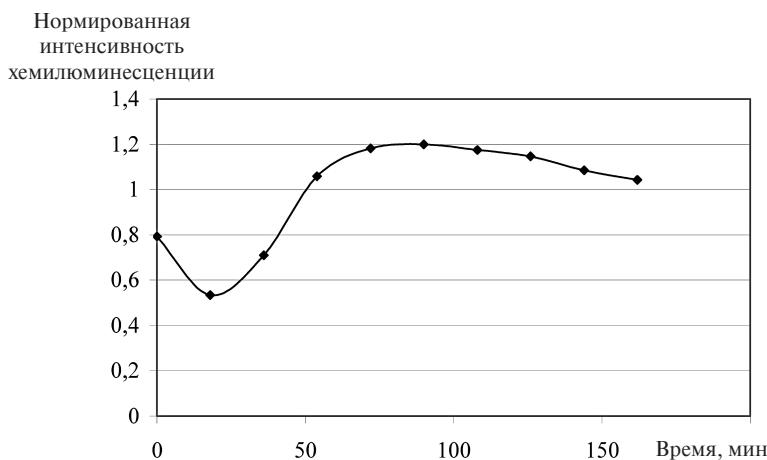


Рис. 3. Зависимость нормированной интенсивности хемилюминесценции ( $\text{Am}$  облученный/ $\text{Am}$  контрольный раствор) от времени после облучения водного раствора сульфата уранила концентрации  $7,56 \cdot 10^{-4}$  моль/л при  $pH = 2,50$  в переменном магнитном поле частотой 20 кГц и плотности магнитного потока 0,78 мкТл

го поля килогерцового диапазона на водный раствор сульфата уранила имеет также волновой характер генерации перекиси водорода, но процесс накопления энергии ассоциатами воды и их релаксация отличаются более длительным характером. При этом сдвиг кинетической кривой во времени не оказывает влияния на выход  $\text{HO}_2^-$  за 2,5-часовую экспозицию.

Таким образом, кинетика генерации  $\text{HO}_2^-$ -ион-радикалов в водном растворе сульфата уранила под действием магнитного компонента практически аналогична их генерации под действием геомагнитного поля Земли, т. е. характер процесса генерации АФК в воде не вызван действием искусственно наведенных полей. Кроме того, изменение интенсивности



воздействующего магнитного фактора также не оказывает влияния на ход процесса, что указывает на иные причины индукции  $\text{HO}_2^{-(*)}$ . Так, слабые внешние электрическое и магнитное поля низкой частоты в основном подавляют самоиндукцию пергидроксильного ион-радикала  $\text{HO}_2^{-(*)}$  (см. табл. 1 и 2). Исключение составляет небольшое повышение (в 1,5 раза) содержания  $\text{HO}_2^{-(*)}$ -ион-радикалов в воде при обработке ее магнитным полем с плотностью потока 13 мкТл и частотой 0,1 кГц, что, вероятно, связано с резонансным воздействием поля на структурные уровни ассоциатов. Такие изменения содержания  $\text{HO}_2^{-(*)}$ -ион-радикалов в воде под действием электрического и магнитного полей указывают на то, что синусоидальное электромагнитное поле — не основной

фактор, приводящий к формированию активных кислородных форм в воде.

Таким образом, под действием переменного электрического и магнитного полей низких частот на водный раствор сульфата уранила концентрации  $7,56 \cdot 10^{-4}$  моль/л происходит подавление генерации активных форм кислорода и перекиси водорода. При этом процесс генерации  $\text{HO}_2^{-(*)}$ -ион-радикалов и их распад носит волновой характер, что обусловливается обменными процессами, связанными с перестройкой ион-кристаллических ассоциатов воды.

Помимо синусоидальной составляющей в электромагнитных полях, формируется и вихревая компонента, которая согласно литературным данным [10] может оказывать значительное влияние на состояние окружающей среды и биологических объектов.

Таблица 1

**Характер изменения равновесной концентрации ион-радикалов  $\text{HO}_2^{-(*)}$  в водном растворе сульфата уранила при воздействии электрического поля**

Напряженность электрического поля, В/м	Частота, кГц	Исходная концентрация ион-радикала $\text{HO}_2^{-(*)}$ , моль/л	Отношение концентрации $\text{HO}_2^{-(*)}$ после облучения к исходной концентрации	Отношение Ам после облучения к исходной Ам
150	0,1	$1,38 \cdot 10^{-7}$	0,83	0,91
0,17	100	$3,49 \cdot 10^{-6}$	0,61	0,49
230	0,1	$1,31 \cdot 10^{-6}$	0,66	0,79
2,2	100	$1,09 \cdot 10^{-6}$	0,48	0,83

Таблица 2

**Характер изменения равновесной концентрации ион-радикала  $\text{HO}_2^{-(*)}$  в водном растворе сульфата уранила при воздействии магнитного поля**

Плотность магнитного потока, мкТл	Частота, кГц	Исходная концентрация ион-радикала $\text{HO}_2^{-(*)}$ , моль/л	Отношение концентрации $\text{HO}_2^{-(*)}$ после облучения к исходной концентрации	Отношение Ам после облучения к исходной Ам
0,50	0,1	$1,62 \cdot 10^{-7}$	0,48	0,68
0,17	100	$1,89 \cdot 10^{-6}$	0,36	0,46
1,3	0,1	$2,07 \cdot 10^{-6}$	1,07	0,50
0,39	100	$1,09 \cdot 10^{-6}$	1,15	1,16



Методы генерации вихревых электромагнитных волн (ВЭМВ) в пространстве описываются обобщенной системой уравнений электродинамики [11]. Представленные в системе уравнения отражают условие генерации вихревого излучения, связанное с созданием в пространстве такого процесса изменения вектора  $\frac{\partial D}{\partial t}$ , в ходе которого не порождается векторное магнитное поле. Такой процесс реализуется при изменении объема единичной заряженной сферы или периодическом изменении заряда на боковой поверхности самогенерирующего устройства в виде водородной плазмы [12]. Вихревое электромагнитное поле приводит систему, в том числе водную среду, в неравновесное состояние, характеризуемое накоплением заряда одного знака.

С целью оценки влияния вихревых электромагнитных волн были проведены исследования изменения равновесной концентрации пергидроксильного радикала  $\text{HO}_2^{(*)}$  в водном растворе сульфата уранила ( $C_{\text{UO}_2\text{SO}_4} = 7,57 \cdot 10^4$  моль/л при  $pH = 2,50$ ) в процессе воздействия ВЭМВ низкой интенсивности хемилюминесцентным методом. Схема установки, используемая в исследованиях, представлена на рис. 4.

Измерения концентрации пергидроксильного ион-радикала  $\text{HO}_2^{(*)}$  и интенсивности хемилюминесценции облучаемого и контрольного раствора сульфата уранила осуществлялись

в течение часа до и после облучения в соответствии с методикой [13]. Средние значения концентрации  $\text{HO}_2^{(*)}$ -ион-радикалов в водном растворе сульфата уранила до и после облучения ВЭМВ в течение двух часов приведены в табл. 3.

Из данных, приведенных в табл. 3, следует, что при воздействии вихревых электромагнитных полей на водный раствор сульфата уранила сразу после облучения происходит существенное снижение концентрации пергидроксильного ион-радикала  $\text{HO}_2^{(*)}$ .

Механизм действия вихревых электромагнитных полей на растворы металлов переменной валентности устанавливался из анализа амплитудно-временных зависимостей кинетики  $\text{HO}_2^{(*)}$ -ион-радикалов в растворе сульфата меди (концентрация  $C_{\text{Cu}^{2+}} = 1,57 \cdot 10^{-5}$  моль/л). Экспериментальная установка включала два изолированных стеклянной перегородкой сосуда с исследуемым раствором, один из которых был подвержен облучению, а другой находился вне поля (рис. 5). В эксперименте использовался генератор вихревых электромагнитных полей [14, 15] мощностью 0,2 Вт (время облучения показано на рисунке в виде заштрихованной области). Измерения концентрации  $\text{HO}_2^{(*)}$ -ион-радикалов осуществлялись попеременно в обоих сосудах с интервалом 6 мин.

Характер протекающих в воде процессов при подобной обработке вихревым электромагнит-

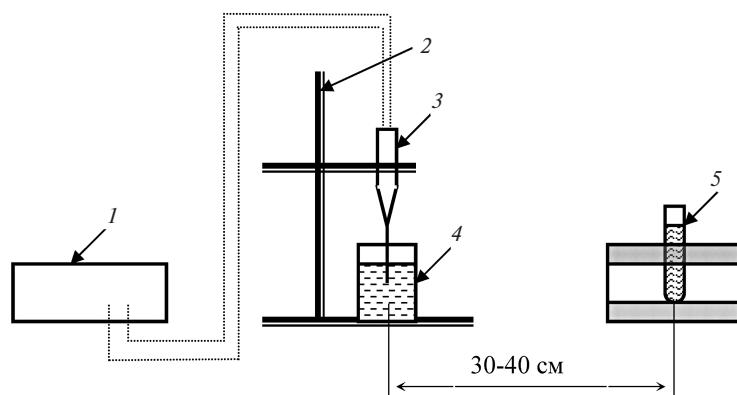


Рис. 4. Установка для исследования влияния вихревых электромагнитных полей на водный раствор сульфата уранила:

1 — генератор высокочастотных сигналов; 2 — штатив; 3 — вихревой электромагнитный генератор (генератор Авраменко); 4 — стакан с дистиллированной водой; 5 — облучаемый раствор

Таблица 3

Изменение равновесной концентрации пергидроксильного ион-радикала  $\text{HO}_2^{-(*)}$  ( $C_{\text{HO}_2^{-(*)}}$ ) в водном растворе сульфата уранила при воздействии ВЭМВ

Параметр	До облучения	После облучения
$C_{\text{HO}_2^{-(*)}}$ , моль/л	$2,16 \cdot 10^{-7}$	$9,00 \cdot 10^{-9}$
Вариабельность $C_{\text{HO}_2^{-(*)}}$ , отн. ед.	0,65	0,57

ным полем соответствует условиям циркуляции вихрей по сверхпроводящим цепочкам. При этом реализуется термически и электрически недиссипативный перенос электромагнитной энергии (продольный градиент электрического потенциала  $\text{grad } E = 0$ , магнитная индукция максимальна:  $B = B_{\text{max}}$ ). Действие вихревого магнитного поля направлено на сверхпроводящие структуры ассоциата, что сопровождается не только магнитными переходами зарядов (увеличением энергии конденсированных электронов), но и изменением спиновых состояний парамагнитных частиц ( $\text{O}_2$ ,  $\text{OH}^{-(*)}$ ,  $\text{H}^{(+)}$ ), а также «разрыхлением» кристаллической решетки фаз ассоциатов. В последующем по интенсивности хемилюминесценции и изменениям в ее кинетической зависимости регистрировались вариации во времени наработки  $\text{H}_2\text{O}_2$ , происходящие в водном растворе сульфата меди.

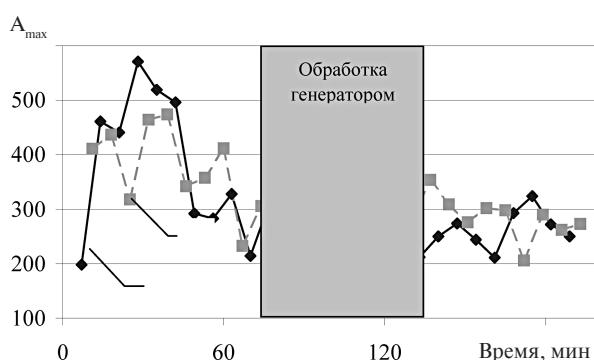


Рис. 5. Зависимость изменения концентрации пергидроксильного ион-радикала  $\text{HO}_2^{-(*)}$  от времени при облучении водного раствора сульфата меди концентрации  $1,57 \cdot 10^{-5}$  моль/л вихревым электромагнитным полем с частотой 46,5 кГц: 1 — контрольный раствор; 2 — облучаемый раствор

Анализ нелинейной генерации  $\text{HO}_2^{-(*)}$  показывает наличие трех периодов (до воздействия излучения генератора, во время и после воздействия излучения) изменения активных форм кислорода в водной системе. В процессе воздействия излучения на водный раствор отмечается увеличение периода колебания и синфазность осцилляций концентрации в обоих изолированных сосудах в начальной фазе, которая в конце и после облучения становится противофазной. Неожиданным является факт резкого увеличения генерации пергидроксильного ион-радикала в растворе до начала воздействия излучения генератора волн (см. рис. 5), которая непосредственно перед включением генератора резко падает (на порядок и более). Этот результат — не артефакт, так как повторяется со 100-процентной воспроизводимостью.

Наблюдаемый характер нелинейной генерации  $\text{HO}_2^{-(*)}$  в воде свидетельствует о макроскопическом квантовом поведении системы, когда изолированные друг от друга объемы воды ведут себя подобно синхронизированным в фазе или противофазе колебаниям контура. При этом реакция среды на воздействие не только распространяется в прошедшем времени, но и имеет место до воздействия, что, на наш взгляд, соответствует сущности вихревого электромагнитного поля как квантовомеханической системы, квантующейся в пространстве и времени.

Таким образом, воздействие ВЭМВ на водные растворы солей урана приводит к затуханию процессов генерации пергидроксильного ион-радикала в первые часы после кратковременного облучения жидкости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексахин, Р.М. Тяжелые естественные радионуклиды в биосфере [Текст] / Р.М. Алексахин, Н.П. Архипов, Р.М. Бархударов [и др.].— М.: Наука, 1990.— 367 с.
2. Гуменюк, В.И. Хемилюминесцентный экспресс-контроль соединений урана в природных водах [Текст] / В.И. Гуменюк, А.В. Кулинкович // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. № 4 (135).— С. 178–186.
3. Бекман, И.Н. Уран [Текст]: Учебное пособие / И.Н. Бекман.— М.: Изд-во МГУ, 2009.— 300 с.
4. Ядерно-географические методы в геологии [Текст]: Сб. науч. тр.— Новосибирск: Наука, 1975.— 125 с.
5. Определение содержания урана в минеральных и горных породах по следам осколков деления [Текст]: Инструкция / Мингеология СССР.— Введена в действие 01.08.1972.— М.: Изд-во Министерства геологии, 1974.— С. 36.
6. Picer, M. Determination of Thorium and Uranium in Biological Matherials [Текст] / M. Picer, P. Stronal // Analyt. chim. Acta.— 1968. Vol. 40. №1.— P. 131–136.
7. Takebayashi, T. Application of the Fission. Trekck Technique to the Determination of Uranium in Natural Water [Текст] / T. Takebayashi, H. Matsuda, S. Umemoto.— Talanta.— 1973. Vol. 20. № 9.— P. 892–895.
8. Гуменюк, В.И. Анализ существующих механизмов генерации активных форм кислорода в водных растворах уранилов [Текст] / В.И. Гуменюк, А.В. Кулинкович // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. № 4 (135).— С. 186–193.
9. Гуменюк, В.И. Влияние процессов трансфор-мации рассеянной энергии ассоциированных состояний воды на генерацию активных форм кислорода в растворах солей урана [Текст] / В.И. Гуменюк, А.В. Кулинкович // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. № 1 (142).— С. 255–262.
10. Богданов, В.П. Анализ мутагенного и стимулирующего действия продольных электромагнитных излучений [Текст] / В.П. Богданов, Е.И. Нефедов, А.А. Протопопов // Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ.— 2000. Т. 8. № 1–2 (27).— С. 37–41.
11. Протопопов, А.А. Физико-математические основы теории продольных электромагнитных волн [Текст] / А.А. Протопопов / Под общ. ред. Е. И. Нефедова, А. А. Яшина.— Тула: Изд-во ТулГУ, 1999.— 110 с.
12. Бутусов, К.П. Симметризация уравнений Максвелла — Лоренца [Текст] / К.П. Бутусов // В кн.: Проблемы пространства и времени в современном естествознании.— СПб., 1991.— С. 388–411.
13. Гаврилов А.В. и др. Хемилюминесцентное определение цианид-ионов // Журнал аналитической химии. 2005. Т. 60. № 11.— С. 1157–1163.
14. Патент № 61463.873 III. Способ и устройство для однопроводной передачи электрической энергии без омических потерь [Текст] / С.В. Авраменко [и др.].— 10.05.2000 г.
15. Авраменко, С.В. Потенциальные возможности монополярного холодноплазменного генератора и экология [Текст] / С.В. Авраменко // Тез. докл. Всеросс. науч. конф. «Физико-химические потери сжигания углеводородных топлив».— Москва, 20–25 мая 1998.— С. 214.

УДК: 693.22

*В.Н. Деркач*

## АНИЗОТРОПИЯ ПРОЧНОСТИ НА РАСТЯЖЕНИЕ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ПРИ РАСКАЛЫВАНИИ

В стеновых конструкциях каменная кладка обычно работает в условиях одноосного, в том числе и внецентренного, сжатия. Однако в ряде случаев возникает необходимость оценки прочности кладки на осевое растяжение, срез и изгиб. В отечественных нормах [1] предусмотрена также проверка прочности кладки при действии главных растягивающих напряжений, которые являются результатом ее работы в условиях плоского напряженного состояния. В таких условиях, например, работают стеновое заполнение каркасов при перекосе в плоскости стен, перегородки, опирающиеся на гибкие диски перекрытий, конструктивные элементы кладки, выполненные из материалов различной деформативности. Одной из важнейших характеристик, используемой при оценке прочности и трещиностойкости каменной кладки в условиях плоского напряженно-деформированного состояния, является ее прочность на осевое растяжение. Поскольку каменная кладка по своим физико-механическим свойствам относится к анизотропным материалам, для оценки ее прочности и трещиностойкости требуется знание прочностных характеристик при растяжении не только в направлении главных осей анизотропии, которые совпадают с горизонтальными и вертикальными растворными швами, но и под различными к ним углами. До сих пор не существует единой стандартизированной методики, позволяющей получить данные характеристики.

Учитывая, что испытания кладки растягивающими усилиями сопряжены с большими технологическими трудностями, ее прочность при растяжении под различными углами к горизонтальным растворным швам можно получить из

испытаний на сжатие в стандартных гидравлических прессах.

В работе [2] показано, что при сжатии образцов каменной кладки по длине силового потока характерно возникновение области двухосного (трехосного) сжатия непосредственно под грузовыми площадками и области сжатия — растяжения между ними. Если высота опытного образца не превышает две ширины, то величины главных растягивающих напряжений по всей высоте сжато-растянутой области распределяются равномерно. Стадия работы, когда в опытном образце при сжатии происходит образование трещин, может быть принята для определения прочности каменной кладки при растяжении.

В стандарте RILEM LUMB 6 (1991) [3] приведена методика определения прочности кладки на растяжение в результате ее раскалывания по диагонали сжатия. В соответствии с данным стандартом можно определить прочность каменной кладки в случае ее механического разрушения по наклонной трещине.

**Методика испытаний.** Определение прочности каменной кладки при растяжении производилось на образцах, форма и размеры которых соответствовали требованиям стандартов EN 1052-1 [4] и RILEM LUMB 6 (1991) [3]. Образцы испытывались сжимающей нагрузкой действующей под углами 90, 45 и 0° к горизонтальным растворным швам (рис. 1).

Виды элементов, из которых готовились опытные образцы кладки, показаны на рис. 2.

Для приготовления кладочных растворов общего назначения использовалась сухая растворная смесь М100 заводского изготовления. Из данной растворной смеси путем изменения

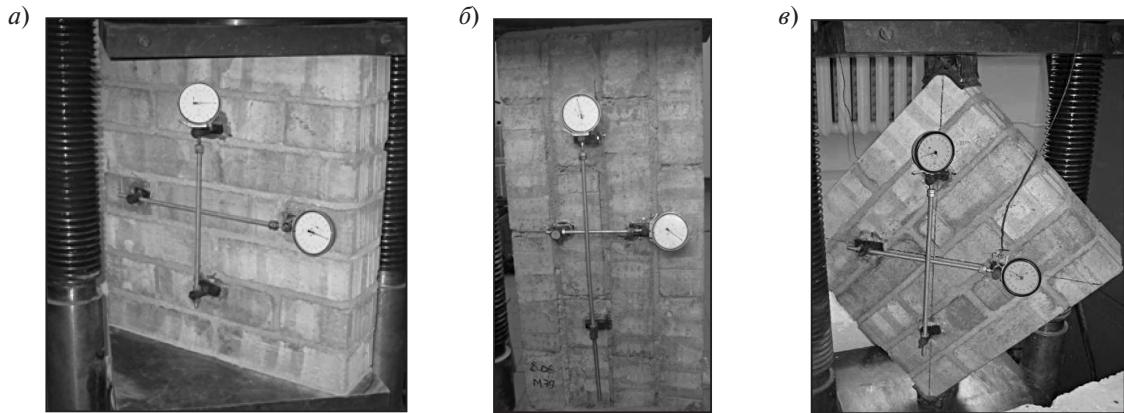


Рис. 1. Общий вид опытных образцов при действии сжимающей нагрузки под углом 90° (а), 45° (б) и 0° (в) к горизонтальным растворным швам

пропорций составляющих готовилась растворная смесь с другими прочностными показателями. Прочность при сжатии раствора устанавливалась в соответствии с требованиями EN 1015–11 [5], а прочность его сцепления с кладочными элементами  $f_w$  — в соответствии с EN 1052–5 [6]. Опытные образцы кладки выполнялись на растворах прочностью при сжатии  $f_m$ ,

равной 10, 9, 7,9 и 3,1 МПа. Для выполнения образцов на тонкослойных швах применялась заводская kleевая растворная смесь М75. Образцы на тонких растворных швах изготавливались из ячеистобетонных блоков D500 прочностью B2,5.

Прочность кладочных элементов при осевом растяжении  $f_{bt}$  принималась равной  $0,33 R_{изг}$ , где

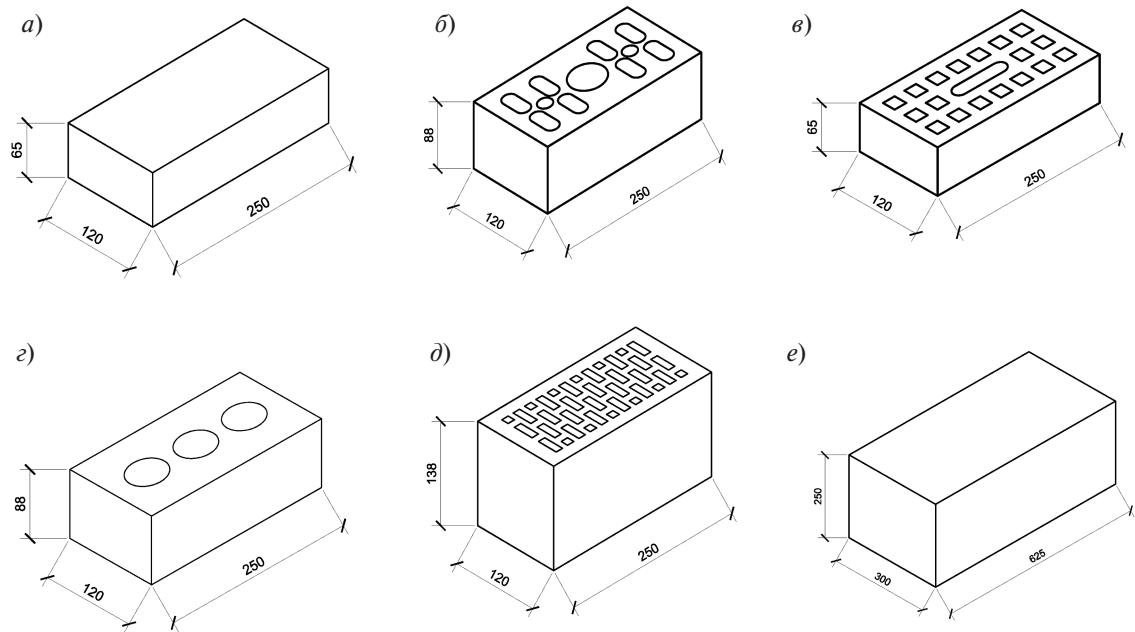


Рис. 2. Форма и геометрические размеры кладочных элементов: а — полнотелый керамический кирпич КРО; б — пустотелый керамический кирпич КРПУ пустотностью  $V=18\%$ ; в — пустотелый керамический кирпич КРПО пустотностью  $V=30\%$ ; г — силикатный кирпич СУР пустотностью  $V=18\%$ ; д — керамический поризованный камень КПП пустотностью  $V=42,3\%$ ; е — ячеистобетонный блок



$R_{изг}$  — предел прочности камня при изгибе, определяемый согласно ГОСТ 8462–85[7]. Прочность ячеистого бетона при растяжении принималась в соответствии с [8].

Испытания образцов каменной кладки при действии сжимающего усилия перпендикулярно и параллельно плоскости горизонтальных растворных швов (рис. 1, *a*, *б*) выполнялись в соответствии со стандартом EN 1052–1. В ходе испытаний определялись нагрузка трещинообразования, относительные продольные и поперечные деформации, по которым устанавливались модуль упругости и прочность каменной кладки при растяжении. Когда угол между направлением действия главных растягивающих напряжений и горизонтальными растворными швами составлял 0 или 90°, определялась прочность каменной кладки при растяжении соответственно по перевязанному или неперевязанному сечениям.

Образцы, испытываемые в соответствии со стандартом [3], подвергались сжатию сосредоточенной силой, приложенной под углом 45° к горизонтальным растворным швам кладки (рис. 1, *в*).

Прочность  $S_{pt}$  каменной кладки на растяжение под углом 45° к направлению горизонтальных растворных швов устанавливалась по формуле

$$S_{pt} = 0,707 \frac{P}{A_n}, \quad (1)$$

где  $P$  — разрушающая нагрузка;  $A_n$  — площадь поверхности разрушения, определяемая по формуле

$$A_n = \frac{(a+b)dn}{2}; \quad (2)$$

$a, b$  — длины сторон испытываемого образца;  $d$  — толщина испытываемого образца;  $n$  — коэффициент, учитывающий пустотность кладочных элементов (отношение площади диагонального сечения без учета пустот (нетто) к общей площади (брутто)).

Всего было испытано 33 серии образцов каменной кладки. Каждая серия включала в себя не менее 5 образцов.

**Результаты испытаний.** При испытании образцов сжимающей нагрузкой, действующей перпендикулярно плоскости горизонтальных растворных швов, образование первых трещин было зафиксировано при нагрузках, составляющих примерно 40–60 % от разрушающей. Трещины совпадали с вертикальными швами кладки и пересекали кладочные элементы (рис. 3, *а*).

При действии сжимающего усилия параллельно плоскости горизонтальных растворных швов происходило разделение массива кладки на отельные столбики трещинами, распространяющимися по горизонтальным швам (рис. 3, *б*). Трещины возникали при нагрузке, составляющей примерно 25–30 % от разрушающей.

При испытаниях опытных образцов сжимающим усилием, действующим под углом 45° к направлению горизонтальных растворных швов, нагрузка трещинообразования и разрушения совпадали. При этом в зависимости от вида кладочного элемента и прочности раство-

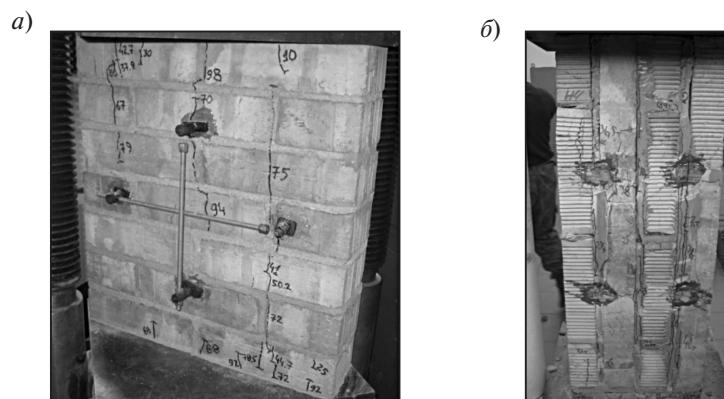


Рис. 3. Характер трещинообразования в опытных образцах при действии сжимающей нагрузки под углом 90 (а) и 0° (б) к горизонтальному растворному шву

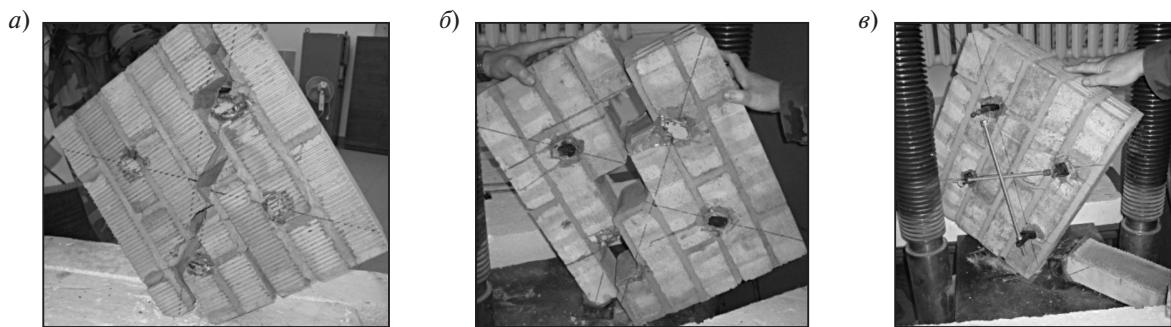


Рис. 4. Характер разрушения опытных образцов при диагональном сжатии:  
 а — по траектории близкой к линии действия сжимающего усилия; б — по зигзагообразной трещине;  
 в — сдвиг нижней версты кладки

ра наблюдались следующие механизмы разрушения:

раскалывание по диагонали, при котором траектория критической трещины, отклоняясь в меньшей или большей степени от линии действия сжимающего усилия, проходит по камням и отдельным вертикальным и горизонтальным швам кладки (рис. 4, а);

раскалывание по диагонали, при котором критическая трещина имеет ступенчатую траекторию и проходит только по горизонтальным и вертикальным швам кладки (рис. 4, б);

сдвиг по горизонтальным растворным швам (рис. 4, в).

Механизмы разрушения, показанные на рис. 4, а, были реализованы в образцах, выполненных на растворе прочностью при сжатии  $f_m = 7,9-10,1$  МПа.

Образцы, изготовленные на растворе прочностью  $f_m = 3,1$  МПа, разрушились либо по трещине, имеющей ступенчатую траекторию (рис. 4, б), либо вследствие сдвига верхней или нижней версты кладки (рис. 4, в).

Результаты определения прочности  $f_{t,obs}$  каменной кладки на растяжение при раскалывании приведены в таблице.

В таблице приведены средние значения прочностных показателей каменной кладки, при

#### Экспериментальные значения прочности каменной кладки при растяжении

Вид и марка кладочного элемента	Прочность кладочного элемента при растяжении $f_{bt}$ , МПа	Прочность кладочного раствора при сжатии $f_m$ , МПа	Экспериментальные значения прочности нормального сцепления $f_{w,obs}$ , МПа	Экспериментальные значения прочности при растяжении под углом $\alpha$ к горизонтальным швам $f_{t,obs}$ , МПа		
				0°	45°	90°
Полнотелый керамический кирпич М150	1,1	10,9	0,32	1,03	0,78	0,48
		7,9	0,31	1,01	0,7	0,37
		3,1	0,14	1,07	0,39	0,25
Керамический кирпич пустотностью 18 % М 125	0,6	10,9	0,28	0,94	0,7	0,4
		7,9	0,27	0,87	0,82	0,3
		3,1	0,16	0,82	0,52	0,28
Керамический кирпич пустотностью 30 % М 150	0,98	10,9	0,27	1,21	1,04	0,47



Окончание табл.

Вид и марка кладочного элемента	Прочность кладочного элемента при растя- жении $f_{bt}$ , МПа	Прочность кладочного раствора при сжатии $f_m$ , МПа	Экспериментальные значения прочности нормального сцепления $f_{w,obs}$ , МПа	Экспериментальные значения прочности при растяжении под углом $\alpha$ к горизон- タルным швам $f_{t,obs}$ , МПа		
				0°	45°	90°
Поризованный керами- ческий камень пустот- ностью 42,3 % М 150	0,97	10,9	0,6	0,82	0,98	0,55
Силикатный пустоте- лый кирпич М 150	0,7	10,9	0,19	0,79	0,61	0,37
		3,1	0,03	0,75	0,58	0,13
Ячеистобетонный блок D500 B2.5 на тонкослой- ном kleевом растворе	0,23	7,5	0,08	0,3	0,24	0,07

этом коэффициент вариации прочности при растяжении в зависимости от метода испытаний находился в пределах 20–30 %.

Из таблицы следует, что опытные значения прочности каменной кладки при растяжении по перевязанному сечению ( $f_{t,obs}$  при  $\alpha = 0^\circ$ ) образцов, выполненных из полнотелого кирпича, независимо от прочностных характеристик раствора были близки к прочности кирпича на осевое растяжение  $f_{bt}$ . Прочность при растяжении по перевязанному сечению образцов из дырчатого керамического и силикатного кирпича была в 1,1–1,7 раза выше значения  $f_{bt}$ .

Опытные значения прочности каменной кладки по неперевязанному сечению ( $f_{t,obs}$  при  $\alpha = 90^\circ$ ) в 1,1–2 раза превышали значениям прочности нормального сцепления раствора с кладочными элементами  $f_{w,obs}$ . С увеличением прочности раствора  $f_m$  прочность каменной кладки на растяжение по неперевязанному сечению возрастила.

В случае действия растягивающих напряжений под углом  $\alpha = 45^\circ$  к направлению горизонтальных растворных швов образцы, изготовленные на прочных растворах  $f_m = 7,9–10,9$  МПа, показали прочность каменной кладки  $f_{t,obs}$  близкую к значениям прочности камня при растяжении  $f_{bt}$ . При этом прочность  $f_{t,obs}$  образцов, выполненных из полнотелого керамического и силикатного дырчатого кирпича, была соот-

ветственно в 1,5 и 1,1 раза ниже прочности камня на растяжение  $f_{bt}$ , а образцов из керамического дырчатого кирпича и поризованных камней практически совпадала с прочностью  $f_{bt}$ . Для образцов, изготовленных на слабом растворе, разница между прочностью кладки  $f_{t,obs}$  и прочностью камня при растяжении  $f_{bt}$  была существенно выше. Объясняется это разными механизмами разрушения образцов, выполненных на прочном и слабом растворах.

Графическая интерпретация полученных результатов приведена на рис. 5.

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие заключения:

1. Прочность каменной кладки на растяжение при раскалывании  $f_{t,obs}$  при действии растягивающих напряжений параллельно горизонтальным растворным швам ( $\alpha = 0$ ) не зависит от прочности раствора  $f_m$  и близка к прочности кладочных элементов при растяжении  $f_{bt}$ .

2. В случае действия растягивающих напряжений под углом  $\alpha = 45^\circ$  к горизонтальным растворным швам прочность каменной кладки на растяжение при раскалывании  $f_{t,obs}$  близка к прочности кладки  $f_{t,obs}$  при угле  $\alpha = 0^\circ$  для образцов, изготовленных на прочных растворах. Если кладка выполнена на слабом растворе, то ее прочность при растяжении параллельно горизонтальным растворным швам существенно превышает значение  $f_{t,obs}$  при  $\alpha = 45^\circ$ .

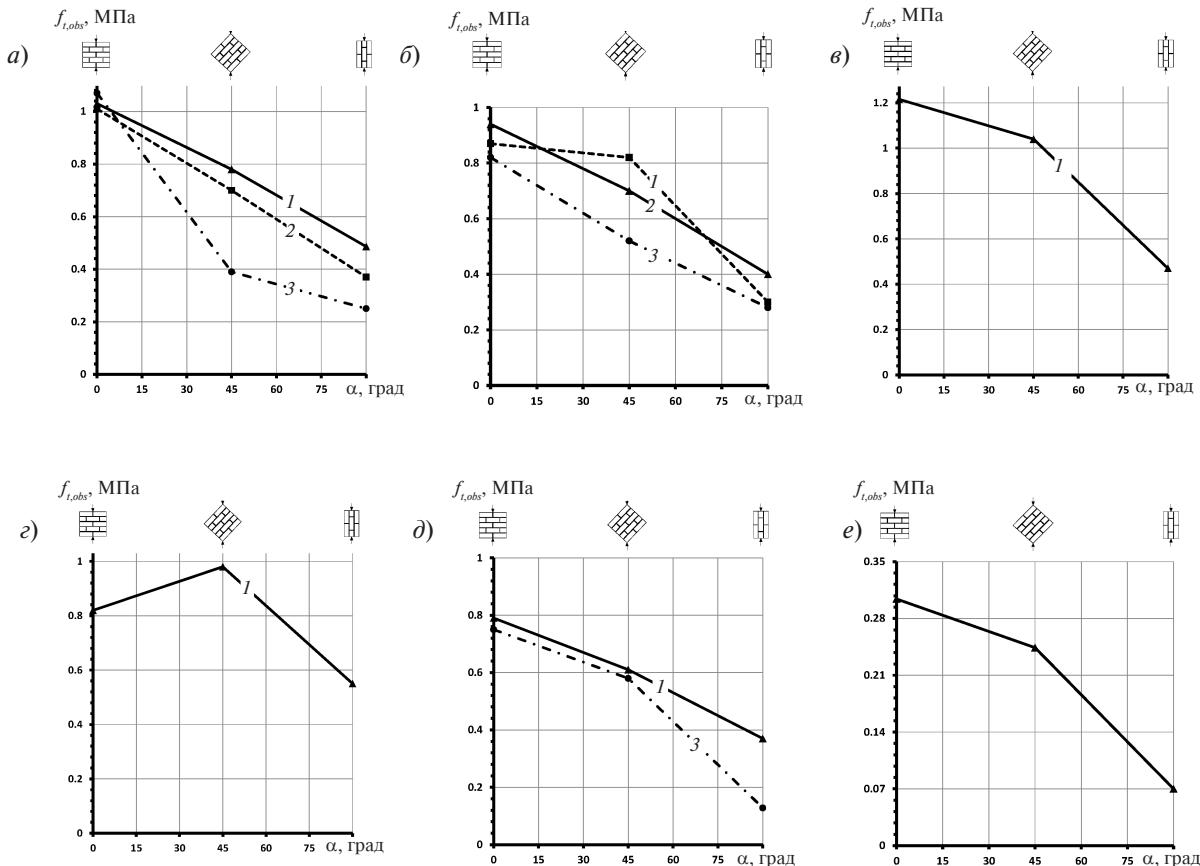


Рис. 5. Графики зависимости прочности кладки при растяжении  $f_{t,obs}$  от угла  $\alpha$  направления растягивающих напряжений к горизонтальным растворным швам

(*а* — кладка из полнотелого кирпича; *б* — из пустотелого кирпича  $V = 18\%$ ; *в* — из пустотелого кирпича  $V = 30\%$ ; *г* — из поризованных камней  $V = 42,3\%$ ; *д* — из силикатного кирпича; *е* — из ячеистобетонных блоков) при  $f_m$ , равном 10,9 (1) 7,9 (2) и 3,1 (3)

3. Прочность каменной кладки на растяжение при раскалывании  $f_{t,obs}$  при действии растягивающих напряжений перпендикулярно плоскости горизонтальных растворных швов ( $\alpha = 90^\circ$ ) ниже прочности  $f_{t,obs}$ , определенной для углов  $\alpha = 0$

и  $\alpha = 45^\circ$ , и близка к прочности нормального сцепления раствора с кладочными элементами  $f_{w,obs}$ . С увеличением прочности кладочных растворов прочность каменной кладки  $f_{t,obs}$  при  $\alpha = 90^\circ$  возрастает.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП II-22-81\* Каменные и армокаменные конструкции [Текст] / Госстрой СССР.— М.: Стройиздат, 1983.— 40 с.
2. Соколов, Б.С. Исследования сжатых элементов каменных и армокаменных конструкций [Текст] / Б.С. Соколов, А.Б. Антабов.— М: АСВ, 2010.— 104 с.
3. RILEM LUMB6 1991. Diagonal tensile strength tests of small walls specimens. TC76-LUM [Текст] / 5 р.
4. EN 1052-1-1998. Prüfverfahren für Mauerwerk. Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit [Текст].— 10 р.
5. EN 1015-11:1999. Prüfverfahren für Mörtel für
- Mauerwerk.— Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel [Текст].— 16 р.
6. EN 1052-5:2005. Prüfverfahren für Mauerwerk - Teil 5: Bestimmung der Scherfestigkeit bei einer Feuchtesperrschicht [Текст].— 12 р.
7. ГОСТ 8462-85. Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе [Текст]. М.: Госстрой СССР, 1985.— 7 с.
8. Руководство по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из ячеистых бетонов [Текст] / Госстрой СССР.— М.: Стройиздат, 1977.— 101 с.



УДК 621.311.22(075.8)

В.Г. Киселёв

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛОВ ПОДЗЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ.

Энергетическое оборудование вообще и тепловые сети в частности подвержены интенсивному коррозионному износу, что и обуславливает использование различных мероприятий для их защиты от коррозии. Существенную роль в оценке выбора конкретного вида антикоррозионной защиты и оценке ее эффективности играют коррозионные измерения, включающие, прежде всего, измерение токов, сопротивлений и потенциалов. Особенно велика роль измерения стационарных и поляризационных потенциалов металлических сооружений, находящихся в электролитической среде. Потребность в них возникает, например, при защите тепловых сетей от почвенной коррозии или коррозии, обусловленной постоянными и переменными буждающими токами, а также при оценке качества диэлектрических покрытий. В последнее время в технике измерения поляризационных потенциалов наблюдаются существенные изменения, обусловленные активным сотрудничеством компаний, эксплуатирующих трубопроводные системы, с европейскими партнерами. Дело в том, что ГОСТ 9.602–2005 [1], ГОСТ Р 51164–98 [2] и ряд других отечественных нормативных документов, посвященных защите подземных металлических сооружений от коррозии, рекомендуют при измерениях поляризационных потенциалов использовать метод модельного электрода с прерывателем тока, в то время как соответствующие немецкие нормативные документы требуют прежде всего использовать различные модификации метода отключения. Ситуация в этом направлении еще более обостряется в связи с активным участием нашей страны в международном разделении труда. Рассмотрению основных проблем, связанных с распространением на нашей территории европейских методов измерения, прежде всего — методов измерения поляризационных потенциалов подземных металлических коммуникаций (ПМК), и посвящена данная статья.

### Измерение стационарных электродных потенциалов

Под стационарным (компромиссным, равновесным) потенциалом в электрохимии понимают потенциал электрода, на поверхности которого протекают две или более электрохимических реакций, так что общая скорость катодного процесса равна общей скорости анодного процесса. В отношении ПМК стационарный потенциал — это потенциал коррозии, на который не оказывают влияние никакие внешние факторы, способные вызвать поляризацию подземного сооружения целиком или хотя бы части его. В этом случае отсутствуют как постоянные, так и переменные буждающие токи и электрохимическая защита. Непосредственное измерение стационарных потенциалов как факторов, определяющих опасность коррозии ПМК или их защищенность, не требуется. В то же время при определении опасного воздействия переменного или постоянного буждающих токов на стальные трубопроводы требуется определять смещение потенциала трубопровода по отношению к его стационарному потенциалу. В соответствии с ГОСТ 9.602–2005 измерение стационарных потенциалов необходимо и при определении суммарных потенциалов, т. е. включающих как поляризационную, так и омическую составляющие.

Кроме того, если для оценки эффективности электрохимической защиты в качестве минимального защитного потенциала выбирается такой критерий, как смещение потенциала коммуникации относительно стационарного потенциала ПМК в отрицательную сторону на 100 мВ, то также становится необходимым определение стационарного потенциала. В соответствии с ГОСТ 9.602–2005 «стационарный потенциал подземного сооружения определяют при выключенных средствах электрохимической защиты путем непрерывного измерения и регистрации разности потенциалов между сооружением



и медно-сульфатным электродом сравнения в течение достаточно длительного времени — вплоть до выявления практически не изменяющегося во времени значения потенциала (в пределах 0,04 В). Как правило, это относится к периоду перерыва в движении электрифицированного транспорта, например в городах в ночное время суток, когда буждающий ток отсутствует. За стационарный потенциал сооружения принимают среднее значение потенциала при разности измеренных значений не более 0,04 В». Следует отметить, что в отношении измерения стационарных потенциалов требования отечественных нормативных документов практически совпадают с аналогичными требованиями европейских норм.

### Измерение поляризационных электродных потенциалов методом модельного электрода

В электрохимии под электродной поляризацией понимают разность между равновесным электродным потенциалом и потенциалом электрода под током. Иногда этот термин трактуется более широко и под электродной поляризацией понимают разность между стационарным электродным потенциалом и потенциалом электрода под током. Поскольку измерение потенциалов всегда осуществляется относительно какого-либо электрода сравнения (например, в научных исследованиях обычно используется водородный электрод сравнения), то значение потенциала электрода под током, измеренное относительно стандартного водородного электрода, и будет поляризационным электродным потенциалом по водородному электрода. В случае ПМК часто используют ионно-металлический медно-сульфатный электрод сравнения. Разность потенциалов между электродом сравнения и ПМК под током и будет поляризационным потенциалом ПМК по медно-сульфатному электроду сравнения. В лабораторных условиях поляризационные потенциалы без омической составляющей измеряются с достаточно большой точностью вплоть до 0,001 В и выше. Это достигается: уменьшением диффузионного потенциала, например за счет использования солевого мостика; уменьшением омического падения напряжения в электролите, расположенному между электродом под током и электродом срав-

нения, путем максимально допустимого приближения электрода сравнения к электроду, потенциал которого определяется.

Лабораторная практика развила специальную технику для таких измерений, которая называется «измерением поляризационных потенциалов с использованием капилляров Лутгина». В этом случае капилляр, соединенный с электродом сравнения, приближают на минимально возможное расстояние к электроду, потенциал которого определяется, но так, чтобы не искажить электрическое поле в окрестностях этой области. В этом случае ток, текущий между измеряемым электродом сравнения и вспомогательным электродом, обуславливает некоторое омическое падение потенциала в электролите, в том числе и в слое электролита, расположенном между измеряемым электродом и кончиком капилляра. Тогда измеряемая разность потенциалов между электродом, потенциал  $U_1$  которого определяется, и вспомогательным электродом с потенциалом  $U_2$ , равная  $U$ , должна включать и омическую составляющую падения потенциала —  $U_{\text{ом}}$ , которая непосредственно не входит в кинетические уравнения электрохимических процессов и, следовательно, оказывает весьма ограниченное влияние на скорость коррозионного процесса. Измеренный потенциал можно представить в следующем виде:

$$U = (U_1 - U_2) + U_{\text{ом}}, \quad (1)$$

где

$$U_{\text{ом}} = i s r. \quad (2)$$

Здесь  $i$  — плотность электрического тока, текущего через измеряемый электрод;  $s$  — расстояние от измеряемого электрода до отверстия капилляра Лутгина;  $r$  — удельное сопротивление электролита.

Из приведенных формул можно заключить:

1) погрешность при измерении поляризационного потенциала, обусловленная омическим падением потенциала в растворе электролита, увеличивается с ростом удельного сопротивления электролита, расстояния между измеряемым электродом и электродом сравнения, а также плотности электрического тока, текущего через измеряемый электрод;

2) при измерениях с анодным током за счет омического падения потенциала прибор показывает величину поляризационного потенциала



несколько положительнее, чем есть фактически, а при измерениях с катодным током — соответственно несколько отрицательнее.

Кроме того, поскольку эти формулы были получены на основании закона Ома с учетом линейного падения потенциала, то следует ожидать, что омическое падение потенциала (без учета падения потенциала, вызванного измерительным током) ограничено некоторой максимальной величиной. Действительно, как показывает практика, при достаточном расстоянии от измеряемого электрода (ПМК) суммарный потенциал, включающий как поляризационную, так и омическую составляющие, перестает изменяться с увеличением расстояния.

При измерении поляризационных потенциалов в технике защиты подземных металлических коммуникаций от коррозии для исключения омической составляющей потенциала практически используют два метода: метод отключения и метод модельного электрода.

В случае измерений методом модельного электрода, который, как правило, использует металлическую пластинку, изготовленную из такого же материала, что и трубопровод, изолированную с одной стороны, имеющую металлическую связь с трубопроводом и помещенную в грунт в непосредственной близости от трубопровода, потенциал определяется между модельным электродом и электродом сравнения. Таким образом, в этих условиях модельный электрод является искусственным дефектом изоляции трубопровода. Метод модельного электрода имеет две разновидности. В первой, которая, в частности, вошла в ГОСТ 9.602—2005, измерение поляризационного потенциала производится в период кратковременных отключений модели от ПМК. При этом используются специальные схемы прерывателей тока, обеспечивающие длительность коммутации цепи «модельный электрод — сооружение» порядка 10 мс, а длительность коммутации цепи «модельный электрод — электрод сравнения» — порядка 0,25 мс. Такой режим коммутации и использование специальной накопительной электрической емкости в коммутаторе позволяют поддерживать потенциал модельного электрода практически на уровне потенциала ПМК.

В полевых измерениях поляризационного потенциала ПМК, которые предписываются,

в частности, для всех вновь построенных и реконструируемых трубопроводов, рекомендуется измерять поляризационные потенциалы с использованием стационарного или переносного медно-сульфатного электрода сравнения и датчика поляризационного потенциала.

Нормативной документацией, принятой в Германии, в специальных случаях — при наличии постоянных блуждающих токов — рекомендуется применять вторую разновидность метода модельного электрода. Суть ее заключается в том, что модельный электрод помещают на минимально возможное расстояние по отношению к медно-сульфатному электрому, так что омическое падение потенциала сводится к минимуму. Основное преимущество второй модификации метода модельного электрода — отсутствие необходимости в специальном прерывателе тока. Измерения поляризационных потенциалов методом модельного электрода можно проводить и при наличии постоянных блуждающих токов. В то же время эта методика имеет и ряд недостатков, снижающих точность измерения. К ним следует отнести следующие факторы:

влияние на результаты измерений возможного разброса поляризационных кривых модели и реального объекта. Практика показывает, что в отдельных случаях эта погрешность может составлять нескольких десятых В, и она растет с ростом удельного сопротивления грунта;

влияние размера модели. Известно, что при воздействии электрического тока с ростом площади дефекта при прочих равных условиях уменьшается его поляризация;

влияние электрического поля ПМК. Оценить эту погрешность достаточно сложно, так как она зависит от многих факторов. Она возрастает с ростом удельного сопротивления грунта и плотностью защитного тока. Максимально возможная ее величина оценивается в 70 мВ.

### Измерение поляризационных потенциалов методом отключения

Метод отключения относительно редко используется в отечественной практике. В то же время это основной метод для определения поляризационных потенциалов в ряде западных стран, например в Германии.

Физическая сущность его заключается в том, что время релаксации для омической и электро-



химической поляризации различается на несколько порядков. Поэтому при отключении тока за время порядка  $10^{-6}$  с устраняется омическая поляризация. А электрохимическая поляризация, которая ответственна за скорость перехода и, в свою очередь, подразделяется на две разновидности — активационную и концентрационную, исчезает гораздо медленнее. Так, например, концентрационная поляризация, играющая основную роль в процессах почвенной коррозии, существенно сокращается за время более одной секунды. Следовательно, если провести измерения в течение одной секунды и менее, то можно определить электрохимическое перенапряжение. Время релаксации активационной поляризации занимает промежуточное положение между временем релаксации концентрационной поляризации и временем релаксации омического падения потенциала, но, как уже отмечалось, за электрохимическое перенапряжение при почвенной коррозии ответственна в основном концентрационная поляризация (диффузионное кислородное перенапряжение), и, следовательно, активационная поляризация не оказывает заметного влияния на результаты измерений. Практика показывает, что изменение потенциала при отключении тока можно с достаточной точностью аппроксимировать экспоненциальной функцией  $U(t)$ . Тогда изменение потенциала с течением времени  $t$  при переключении плотности тока от величины  $i_1$  до величины  $i_2$  будет выражаться следующее функцией:

$$U(t) = U(i_2) + (i_1 - i_2)[(r_p \exp(-t/a_p) + r_m \exp(-t/a_m)], \quad (3)$$

где  $r_p$  и  $r_m$  — соответственно удельные сопротивления поляризации и грунта;  $a_p$  и  $a_m$  — времена релаксации соответственно концентрационной и омической поляризации, а  $U(i_2)$  — стационарный потенциал ПМС при наличии электрического тока с плотностью  $i_2$ . Потенциал  $U(i_2)$  может быть рассчитан по следующей формуле:

$$U(i_2) = U_R + (r_p + r_m)i_2, \quad (4)$$

где  $U_R$  — равновесный (коррозионный) потенциал при отсутствии тока, протекающего через систему. Так как  $a_p$  значительно больше, чем  $a_m$ , то непосредственно сразу после переключения (выключения) тока  $\exp(-t/a_p) = 1$ , а  $\exp(-t/a_m) =$

$= 0$ . Таким образом, из уравнения (3) следует, что потенциал переключения  $U_{um}$ , т. е. потенциал, который принимает ПМС после изменения плотности тока с  $i_1$  до  $i_2$  непосредственно сразу после переключения тока, равен следующей величине:

$$U_{um} = U(i_2) + (i_1 - i_2)r_p = U(i_1) - (i_1 - i_2)r_m. \quad (5)$$

Стационарный потенциал, который имеет ПМС под током  $i_1$  перед переключением, называется потенциалом включения  $U_{ein}$ . Он определяется формулой

$$U_{ein} = U(i_1) = U_R + (r_p + r_m)i_1. \quad (6)$$

$U_{ein}$  содержит омическое падение напряжения  $r_m i_1$  и поляризационный потенциал, свободный от омической составляющей  $U_{IR}$ , равный следующей величине:

$$U_{IR} = U_R + r_p i_1. \quad (7)$$

Из формул (4–6) и (7) после несложных преобразований получаем

$$U_{um} = U_{IR}(i_1) + r_m i_2; \quad (8)$$

$$r_m = (U_{um} - U_{ein})/(i_2 - i_1); \quad (9)$$

$$U_{IR} = (U_{ein} i_2 - U_{um} i_1)/(i_2 - i_1). \quad (10)$$

Анализ последних трех формул показывает, что возможно несколько модификаций метода отключения:

1. Измерение разности потенциалов между ПМК и электродом сравнения, который находится на поверхности земли, через определенное малое время после отключения тока (метод переключения). В этом случае формулу (10) можно аппроксимировать при условии малого изменения тока следующим выражением:

$$U_{IR} = -(xU_{ein} - U_{um})/(1 - x), \quad (11)$$

где

$$x = i_2/i_1. \quad (12)$$

2. Метод переключения с использованием экстраполяции, при котором определяют зависимость потенциала ПМС от времени и прогнозируют ее значение на момент времени равный нулю. Для реализации этого способа, как правило, требуется быстродействующие записывающие приборы.

3. Метод измерения при отключении тока, т. е. определение потенциала отключения  $U_{aus}$  при  $i_2 = 0$ . В этом случае из формул (5–10) следует

$$U_{aus} = U_{IR} = U_{ein} - r_m i_1. \quad (13)$$



Эта разновидность метода отключения наиболее широко используется в измерительной практике при защите ПМС от коррозии.

Измерение стационарных потенциалов гомогенного электрода с поверхности грунта была рассмотрена ранее. В данном случае погрешность измерения потенциала определяется качеством измерительного прибора и сопротивлениями элементов электрической цепи, которые могут быть подобраны так, чтобы обеспечить удовлетворительную для практики точность измерений. В случае протяженных ПМК уже нельзя считать, что мы имеем дело с гомогенным электродом, так как в силу неоднородности грунта, различной глубины залегания трубопровода и ряда других факторов на ПМС образуются макрокоррозионные элементы. В этом случае при измерении потенциалов уже определяется некоторая средняя величина стационарного потенциала, которая зависит от сопротивления грунта, величины дефектов, их количества, протяженности ПМС и ряда других факторов. Ситуация еще более усложняется, если определяется поляризационный потенциал трубопровода значительной протяженности. В этом случае при отключении защитного тока наблюдается быстрый спад омического падения напряжения, вызванный защитным током, но одновременно возникают так называемые выравнивающие токи, которые направлены от точки дренирования ПМС через грунт к наиболее удаленным, а следовательно, наименее защищенным участкам трубопровода. Они обусловливают некоторое кажущееся снижение защитного поляризационного потенциала наиболее отрицательной части ПМС, находящейся в окрестности точки дренирования, и кажущееся повышение защитного потенциала в наименее защищенной части трубопровода.

Действительно, пусть напряжение, приложенное к трубопроводу относительно бесконечно удаленной земли будет равно  $U_{ein}$ . Тогда, если рассматривать участок трубопровода с эквипотенциальной поверхностью (ограниченной протяженности), то можно считать, что для каждого дефекта справедлива формула

$$U_{ein} = U_n + I_n R_n, \quad (14)$$

где  $U_n$  — потенциал, свободный от омической составляющей (поляризационный потенциал) в месте дефекта;  $I_n$  — поляризационный ток для

отдельного дефекта при общей силе тока  $I_1$ ;  $R_n$  — сопротивление растекания (омическое сопротивление) отдельного дефекта.

Тогда ток, текущий через весь трубопровод, будет определяться следующей формулой:

$$I_1 = \sum_n I_n = \sum_n (U_{ein} - U_n) / R_n. \quad (15)$$

Соответственно после переключения тока с величины  $I_1$  на величину  $I_2$  получим

$$I_2 = \sum_n I_n^* = \sum_n (U_{um} - U_n) / R_n, \quad (16)$$

где  $I_n^*$  — поляризационный ток для отдельного дефекта при общей силе тока  $I_2$ ;  $U_{um}$  — потенциал переключения, определяемый в соответствии с формулой (5).

Для гомогенного электрода потенциал, свободный от омической составляющей  $U_{IR}$ , определяется формулой (10), т. е. путем измерения  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $U_{um}$ ,  $U_{ein}$ . Очевидно, что в случае гетерогенного электрода мы измеряем те же величины, но они уже относятся ко всему гетерогенному электроду и, следовательно, не совпадают с конкретными значениями поляризации для отдельных дефектов. Это означает, что, определив, например, нижнюю границу защитного потенциала для всего ПМС в  $-0,85$  В по медно-сульфатному электроду сравнения, мы не можем гарантировать, что все дефекты обладают защитным потенциалом. Действительно, переписав уравнения (9) и (13) для интегральных токов, текущих через гетерогенный электрод, и для общего сопротивления растекания гетерогенного электрода, получаем следующие уравнения:

$$R_m = (U_{um} - U_{ein}) / (I_2 - I_1); \quad (9^*)$$

$$U_{aus} = U_{IR} = U_{ein} - R_m I_1. \quad (13^*)$$

В свою очередь, соотношение (10) для метода переключения можно представить в следующем виде:

$$U_{IR} = (U_{ein} I_2 - U_{um} I_1) / (I_2 - I_1). \quad (17)$$

Подстановка в последнюю формулу значений  $I_2$  и  $I_1$  из (15) и (16) после несложных преобразований позволит записать следующее уравнение:

$$U_{IR} = \left( \sum_n U_n / R_n \right) / \sum_n (1 / R_n). \quad (18)$$



Следовательно, поляризационный потенциал гетерогенного электрода представляет собой некоторую среднюю величину, зависящую от поляризации и сопротивления растекания отдельных дефектов. Совместное использование формулы (18) и модельных представлений для дефекта ПМК позволяет оценить величину поляризации как функцию удельного сопротивления грунта и размера дефекта. В случае, если рассматривается ПМС с достаточно массивной теплоизоляцией и, например, с гидроизоляцией, как это обычно имеет место в тепловых сетях, необходимы характеристики и этих покрытий. Общее сопротивление «дефект изоляции — бесконечно удаленная земля» определяется по следующей формуле:

$$R = R_{\text{п}} + R_{\text{пд}}, \quad (19)$$

где  $R_{\text{п}}$  — поляризационное сопротивление дефекта;  $R_{\text{пд}}$  — омическое сопротивление дефекта.

В свою очередь, омическое сопротивление дефекта определяется следующей формулой (случай, например, газопровода, т. е. ПМС без теплоизоляции):

$$R_{\text{пд}} = R_{\text{эд}} + R_{\text{рз}}, \quad (20)$$

где  $R_{\text{эд}}$  — сопротивление электролита (земли) в дефекте изоляции. Дефект считается цилиндрическим;  $R_{\text{рз}}$  — сопротивление растекания круглого дефекта. Тогда для сопротивления электролита в дефекте получаем

$$R_{\text{эд}} = r_m h / S = 4r_m h / \pi d^2. \quad (21)$$

Сопротивление растекания круглого дефекта определяется следующей формулой:

$$R_{\text{рз}} = r_m / 2d, \quad (22)$$

где  $h$  — глубина дефекта (толщина слоя изоляции);  $S$  — площадь поверхности дефекта;  $d$  — диаметр дефекта. Сопротивление  $R_{\text{п}}$  поляризации дефекта равно

$$R_{\text{п}} = r_p / S = 4r_p / \pi d^2. \quad (23)$$

Поскольку стационарный потенциал ПМС в грунте обычно равен  $-0,55$  В, а при катодной защите минимальный защитный потенциал равен соответственно  $-0,85$  В, то, следовательно, смещение потенциала при катодной поляризации, как правило, составляет  $0,3$  В.

Из практики известно, что защитный потенциал стальной неизолированной поверхно-

сти достигается при силе тока, равной приблизительно  $0,3 \text{ A/m}^2$ . Значит, величину удельного поляризационного сопротивления можно приблизительно определить следующим образом:

$$r_p = (0,3 \text{ В}) / (0,3 \text{ А/м}^2) = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2. \quad (24)$$

Зная величину поляризационного сопротивления, приложенное напряжение к ПМС ( $U_{\text{ein}}$ ), размеры дефекта и удельное сопротивление грунта, можно рассчитать падение напряжения на поляризационном сопротивлении дефекта и таким образом определить  $U_{\text{aus}}$ . Сравнение  $U_{\text{aus}}$  с критериями защищенности подземных металлических сооружений показывает наличие или отсутствие на них защитного потенциала, предусмотренного нормативными документами. Расчеты показывают, что поляризационный потенциал дефекта при прочих равных условиях уменьшается с ростом величины дефекта и удельного сопротивления грунта. Отсюда следует, что повышение качества изоляции ПМС способствует и повышению точности измерения поляризационных потенциалов методом отключения.

Практика показала, что при длительной работе катодной защиты наблюдается некоторое дополнительное сопротивление при прохождении защитного тока. Его связывают с образованием покровного слоя на поверхности металла, а сопротивление покровного слоя  $R_{\text{д}}$  определяют по следующей формуле:

$$R_{\text{д}} = r_{\text{д}} / S = 4r_{\text{д}} / \pi d^2, \quad (25)$$

где  $r_{\text{д}}$  — удельное сопротивление единицы площади покровного слоя, а  $S$  и  $d$  имеют те же значения, что и в формуле (24).

Для тепловых сетей с теплоизоляцией и гидроизоляцией при дефекте гидроизоляции формулу (20) необходимо дополнить еще одним членом, характеризующим омическое сопротивление электрическому току теплоизоляции  $R_{\text{пти}}$ :

$$R_{\text{пд}} = R_{\text{эд}} + R_{\text{рз}} + R_{\text{пти}} \quad (26)$$

Величина  $R_{\text{пти}}$  обычно определяется следующим выражением:

$$R_{\text{пти}} = r_{\text{ти}} / 2d, \quad (27)$$

где  $d$ , как и ранее, — диаметр дефекта, а  $r_{\text{ти}}$  — удельное сопротивление теплоизоляции. Часто наблюдается следующее соотношение между



удельными сопротивлениями теплоизоляции  $r_{ti}$ , гидроизоляции  $r_{ti}$  и грунта  $r_m$ :

$$r_{ti} > r_{ti} > r_m. \quad (28)$$

Как мы уже выяснили ранее, при катодной поляризации различные участки трубопровода имеют различный поляризационный потенциал. Это обусловлено, прежде всего, следующими причинами: наличием омического сопротивления трубопровода; различным удельным сопротивлением грунта; различной величиной дефектов.

Очевидно, что при отключении защитного тока, должно происходить выравнивание потенциалов, которое, в свою очередь, создает электрический ток в грунте. Протекание этого тока обуславливает омическое падение напряжения, которое складывается с минимальным значением поляризационного потенциала (по абсолютной величине) ПМС, как бы увеличивая его, и вычитается из максимального значения (по абсолютной величине), как бы уменьшая поляризационный потенциал. Эти токи называют уравнивающими. Соответствующая погрешность измерений называется погрешностью, обусловленной омическим падением напряжения от уравнивающих токов. Ее величина может достигать 0,1 В и более. Учет этой погрешности и соответствующая корректировка измерений основывается на том обстоятельстве, что поляризационный потенциал остается неизменным при измерениях  $U_{aus}$  и  $U_{ein}$ . В свою очередь, омическое падение напряжение в грунте можно разбить на две компоненты: вертикальную  $U^v$  и горизонтальную  $U^r$ . Горизонтальную составляющую можно получить, измеряя разность потенциалов между двумя одинаковыми электродами сравнения, один из которых находится над дефектом трубопровода, а второй бесконечно удален от него. При практических измерениях обычно достаточно удаления на 10 м. Вторая компонента не поддается непосредственному определению. В то же время, очевидно, что горизонтальная составляющая падения напряжения должна быть пропорциональна вертикальной составляющей падения напряжения. Вертикальная составляющая равняется  $(U_{ein} - U_p)$ , или  $(U_{aus} - U_p)$ , где  $U_p$  — поляризационное перенапряжение, соответственно горизонтальная —  $U_{ein}^r$  или  $U_{aus}^r$ . Тогда можно составить следующее соотношение:

$$\left( U_{ein}^r \right) / \left( U_{aus}^r \right) = \left( U_{ein}^r - U_p \right) / \left( U_{aus}^r - U_p \right). \quad (29)$$

Кроме  $U_p$ , все остальные величины можно измерить. Окончательно получаем

$$U_p = U_{aus} \left( U_{aus}^r \right) \left( U_{ein}^r - U_{aus}^r \right) / \left( U_{ein}^r - U_{aus}^r \right). \quad (30)$$

На результат оказывает влияние разница собственных потенциалов медно-сульфатных электродов, поэтому перед проведением измерений рекомендуется их тщательно тарировать.

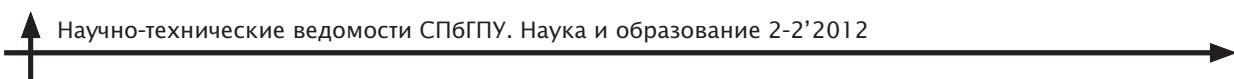
### Использование измерения потенциалов в технике катодной защиты ПМС от коррозии

Отечественными и иностранными, например немецкими, нормативными документами предписывается широкое использование измерения потенциалов в различных областях техники катодной защиты. Измерение потенциалов используется при разработке проектов защиты от коррозии ПМС, при строительстве систем защиты от коррозии для оценки их эффективности, при пусконаладочных работах и в процессе эксплуатации ПМС. При помощи измерения потенциалов определяют опасность почвенной коррозии и коррозии под воздействием переменных и постоянных буждающих токов, эффективность функционирования систем катодной защиты, оценивают размеры дефектов на ПМС и т. д. Рассмотрим основные области применения техники измерения потенциалов при защите от коррозии ПМС.

Наиболее жесткие требования по наличию систем катодной защиты стальных подземных магистральных трубопроводов устанавливает ГОСТ Р 51164—98. В соответствии с пунктом 5.1 «...Все трубопроводы (кроме проложенных над землей) независимо от условий эксплуатации подлежат электрохимической защите.» Следовательно, сам факт строительства стальных магистральных трубопроводов требует создания систем катодной защиты. Очевидно, что измерение потенциалов как критерий необходимости использования электрохимической защиты ПМС в этом случае становится излишним.

Критериями опасности коррозии ПМС в соответствии с п. 4.15. ГОСТ 9.602—2005 «...являются:

коррозионная агрессивность среды (грунтов, грунтовых и других вод) по отношению к металлу сооружения (включая биокоррозионную агрессивность грунтов);



опасное действие блуждающего постоянного и переменного токов».

При оценке по этому критерию во всех случаях, за исключением определения биокоррозионной агрессивности и удельного сопротивления грунта, требуется измерение электрохимических потенциалов. Близкие по смыслу требования к оценке опасности коррозии предъявляет и РД 153-39.4-091-01.

При этом измерение потенциалов может быть использовано либо как самостоятельный вид измерений, либо как составная часть применяемой измерительной методики. Так, измерение стационарных или поляризационных потенциалов при определении необходимости катодной защиты от коррозии проектируемых ПМС используется при определении как средней плотности катодного тока, так и наличия блуждающих токов в земле.

При проектировании вновь сооружаемых тепловых сетей измерения потенциалов требуются только в случае определения опасного влияния постоянного блуждающего тока. Эти требования изложены в п. 3.3 «Типовой инструкции по защите трубопроводов тепловых сетей от наружной коррозии» [3] и в п. 4.7 ГОСТ 9.602-2005.

В случае, если проектирование (реконструкция) катодной защиты осуществляется на существующих или реконструируемых ПМС, тогда измерение потенциалов необходимо: при оценке опасного влияния блуждающего постоянного тока и переменного тока; при измерении поляризационных потенциалов для задач электрохимической защиты; определении суммарного потенциала сооружения, находящегося под электрохимической защитой; измерении потенциала трубопровода канальной прокладки при электрохимической защите трубопроводов с расположением катодного заземления в канале; определении минимального защитного потенциала подземных стальных трубопроводов по смещению от стационарного потенциала. Как уже отмечалось ранее, измерение потенциалов применяется и в технике интенсивных измерений.

Для оценки эффективности функционирования электрохимической защиты могут быть использованы различные критерии защищенности ПМС, однако почти все они в той или иной степени применяют методы измерения потенциалов. Так, в соответствии с п. 5.1 ГОСТ Р 51164-98: «Электрохимическая защита должна обеспечивать в течение всего срока эксплуатации непрерывную во времени катодную поляризацию трубопровода на всем его протяжении (и на всей его поверхности) таким образом, чтобы значения потенциалов на трубопроводе были (по абсолютной величине) не меньше минимального и не больше максимального значений.» Причем для вновь построенных и реконструированных трубопроводов должны быть обеспечены поляризационные потенциалы в интервале от  $-0,85$  В до  $-1,15$  В, а в особых случаях (высокая электропроводность грунтов, опасное влияние блуждающих токов, возможность микробиологической коррозии, высокая температура транспортируемого продукта) нижняя граница может уменьшаться до  $-0,95$  В, а верхняя увеличиваться до  $-1,10$  В. В случае существующих стальных магистральных трубопроводов до проведения комплексного обследования допускается контроль защиты по потенциальному с омической составляющей. Аналогичные критерии защищенности ПМС имеются и в ГОСТ 9.602-2005, РД 153-39.4-091-01[4] и пункте 7.22 РД 153-34.0-20.518-2003.

Отечественная техника защиты от коррозии ПМС в настоящий момент характеризуется активным ростом использования различных методов измерения потенциалов, прежде всего метода отключения.

Произведена классификация существующих методов измерения потенциалов ПМС и указаны особенности их применения при катодной защите подземных металлических сооружений.

Отмечены основные причины, влияющие на точность измерения потенциалов ПМС, прежде всего — на точность измерения потенциалов методом отключения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 9.602-2005. Единая система защиты от коррозии и старения; Сооружения подземные; Общие требования к защите от коррозии [Текст].— М.: Стандартинформ, 2006.

2. ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии [Текст].— М.: Госстандарт России, 1998.

3. РД 154-34.0-20.518-2003. Типовая инструкция по защите трубопроводов тепловых сетей от наружной коррозии [Текст].— М.: Изд-во «Новости теплоснабжения», 2003.

4. РД 153-39.4-091-01. Инструкция по защите городских подземных трубопроводов от коррозии [Текст].— СПб.: Изд-во ДЕАН, 2002.

УДК 628.974.8:72.017.2

*М.В. Харламов*

## ИНТЕРАКТИВНАЯ ПОДСВЕТКА КАК ИНСТРУМЕНТ КОММУНИКАЦИИ В АРХИТЕКТУРЕ

Сегодня вопросы решения светового облика зданий и сооружений — не просто утилитарная необходимость, а творческая задача в области светодизайна, расширяющая границы привычной эстетики архитектуры. Проектирование подсветки с предусмотренными режимами кинетики света и цвета позволяет создавать множество вариаций и интересных эффектов на основе одной пластической формы. В мировой практике архитектурного освещения стала проявляться новая тенденция: использование потенциала осветительных приборов для создания динамически активных объектов, реагирующих на воздействие людей, окружения и формирующих индивидуальный световой облик, для чего требуется интерактивный режим работы освещения.

В качестве наглядных примеров применения подобных технологий можно привести световое оформление таких построек, как Dexia Tower (Брюссель, Бельгия) или «Башня ветров» (Канагава, Япония). В обоих случаях основой для реализации необычного светового образа служат медиафасады. Вертикальный объем «Башни ветров» в темное время суток за счет динамики освещения отображает изменения направленности и скорости ветра. Таким образом, сооружение выступает своеобразным индикатором внешних условий окружающей среды.

Освещение Dexia Tower, напротив, работает по принципам световизуальной «игры» с участием людей. Система подсветки объединена единым программным алгоритмом, который под управлением человека дает нужную цветовую динамику и рисунок. Эпизодическое использование данного режима в рамках определенных

мероприятий превращает фасад здания в интеллектуальное световое полотно, позволяющее жителям города осуществлять развлекательную, коммуникативную и другие функции, воздействуя на систему освещения.

Применение этих принципов представляет широкий потенциал функционально-эстетическим возможностей создания «живой» архитектуры, которая обладает адаптационными качествами по отношению к среде, контексту местности, человеку. При этом одно из важнейших качеств, которое приобретает объект (здание, малая форма и т. д.) с использованием интерактивного освещения, — формирование информационного канала обмена данными. Эту роль берет на себя сложная система подсветки, работающая за счет взаимодействия световых приборов и дополнительного оборудования (датчики, камеры и др.), настроенных на отслеживание действий человека или других явлений, их визуализацию и перевод в светоцветовой образ.

В практике светодизайна интеллектуальные системы освещения все чаще применяются как на уровне проектирования подсветки интерьеров, так и в решении экsterьерного образа. Но при этом в научной литературе данные технологии рассматриваются опосредованно. Без внимания остаются важнейшие свойства интерактивного режима: адаптация света к изменениям условий окружения, а также возможности коммуникации и передачи информации, позволяющие объекту архитектуры выступать проводником городского пространства. Первое из этих свойств служит основой энергоэффективных решений архитектурного освещения, когда сме-



на режимов подсветки отображает изменения внешней среды (к примеру, переключение между вечерним и ночным, праздничным и повседневным освещением). Второе свойство позволяет расширить границы построения образа здания, воспроизводя определенную смысловую семантику с помощью световой визуализации. Более подробно эти свойства будут рассматриваться далее, но прежде остановимся на описании принципов организации коммуникации через инструменты интерактивного освещения.

На основании анализа реализованных проектов мы выделим две принципиальные схемы, иллюстрирующие механизмы организации взаимодействия человека с объектом архитектуры и образования информационно-визуальной связи между ними (рис. 1).

**Циклическая схема** отображает принципы двустороннего диалога. В ходе взаимодействия образуются прямая и обратная связи, последовательным образом передающие сигнал от человека к зданию и, наоборот, от здания к человеку.

В данном случае человек (объект 1) воздействует на систему освещения здания (объект 2), используя набор элементарных действий, на которые запроектировано отзываться освещение (жестикуляция, движение, речь и т. д.). После приема сигнала система освещения здания

приступает к расшифровке данного сообщения и его визуализации через световые символы. И так далее, шаг за шагом происходят последовательные изменения начальных условий за счет интерактивного принципа взаимодействия. Важно отметить, что количество участников такой коммуникативной цепочки может не ограничиваться двумя объектами. Эта связь осуществляется с большим числом оппонентов, но при этом не меняются направления информационно-визуального обмена (передачи — возврата), которые и задают циклическость функционированию режима.

В качестве примера реализации принципов циклической схемы можно привести световую витрину центра La Vitrine Culturelle (Монреаль, Канада). Представленная в виде медиафасада, стена реагирует на проходящих мимо людей, улавливает их перемещение и повторяет его в виде цветового пиксельного изображения.

**Линейная схема** демонстрирует прямую направленность контакта между участниками взаимодействия и отличается тем, что в систему, как правило, включается дополнительный элемент. В качестве него может выступать как третье лицо, устанавливающее программируемый сценарий освещения (объект 3), так и условия внешней среды или внутренней регуляции здания.

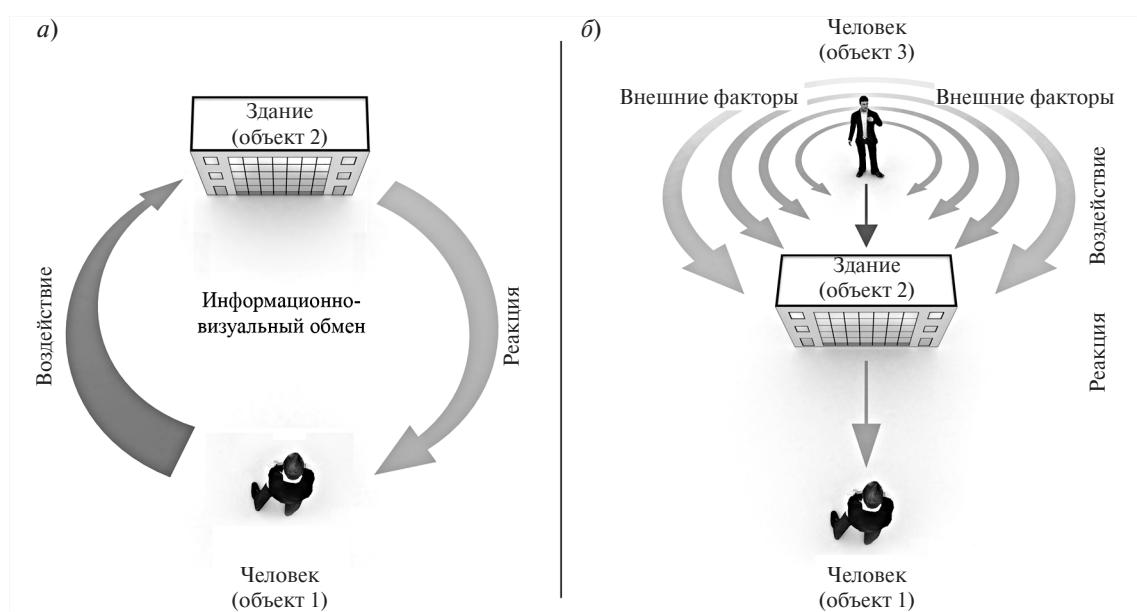


Рис. 1. Схемы организации интерактивного режима освещения: *а* — циклическая; *б* — линейная



Воздействие дополнительного фактора по самостоятельному информационному каналу реорганизует диалоговый принцип, который работал в предыдущем примере. Теперь связь устанавливается в единственном направлении, через буферный элемент — здание (объект 2). Кроме расшифровки и визуализации, система освещения выполняет также задачи по сохранению и передаче преобразованного информационно-визуального сообщения адресату.

Объект архитектуры в этом случае выступает важным информационным компонентом застройки, маяком внешней среды. Таким образом, открывается огромный потенциал возможностей получения информации через световой фасад, который может отображать, к примеру, социологическую статистику, данные о состоянии среды, погодных условиях и т. д.

Реализация линейной или циклической схемы в практике проектирования не просто определяет образную эстетику и динамику световой архитектуры, но также ведет за собой определенные функции, которые могут быть сопряжены с назначением самого здания. Это позволяет учитывать выбор данной комбинации, последовательность интерактивного освещения под конкретные задачи проектирования. К основным функциям интерактивного режима освещения следует отнести информационно-коммуникативную, развлекательную, адаптационную (по отношению к внешним условиям) и эстетическую.

*Информационно-коммуникативная* функция позволяет учитывать изменения внешней среды, преобразовывать их в медиасигнал и передавать адресату через систему освещения. Цвет, последовательная динамика, местоположение пятна по отношению к общему световому полю — все это выступает символами информационного сообщения.

*Развлекательная* функция преобладает в основном при реализации циклической схемы интерактивного режима. Она связана с откликом света на простейшие действия людей, преобразование их в необычные цветосветовые формы, организацию своеобразной «игры», которая привлекает достаточное количество людей.

*Функция адаптации* использует свойство системы наружного освещения изменяться в соответствии с общим светоцветовым фоном. В некоторых случаях это помогает соблюдать принципы пространственного единства, сба-

лансированности яркостных и цветовых соотношений, что способствует созданию зрительно комфортной и гармоничной среды.

Эстетическая функция является одной из важнейших составляющих в реализации любой системы освещения, не только интерактивной. Использование активной светодинамики должно подчиняться ясной композиции, продуманному ритмическому построению световых пятен, взаимосвязи частей и целого, а не случайной комбинаторике. Это служит верным залогом удачного проектного решения.

Разбирая вопросы проектирования светового фасада, а также включения светового поля в композиционную структуру здания, следует обратиться к примерам решений, реализованных в практике мирового светодизайна. К основным типологическим группам, в которых технология интерактивного режима освещения нашла свое применение, относятся преимущественно общественные и в ряде случаев промышленные объекты. Главным образом это музеино-выставочные, торгово-развлекательные и административные здания, павильоны, спортивные комплексы, а также инженерные сооружения и малые архитектурные формы.

Учитывая влияние факторов видимости и зрительной адаптации в темное время суток [1], а также модель восприятия архитектурного пространства в зависимости от угловых размеров объектов, высоты и расстояния до наблюдателя [2], мы можем выделить зоны в структуре здания, определяющие комфорт и удобство наблюдения и интерактивного взаимодействия. На рис. 2 показаны варианты размещения светового поля в объеме зданий различной этажности. Еще один ключевой момент — местоположение объекта в застройке, наличие и габариты прилегающей территории, пространственные характеристики, предполагающие возможность не только восприятия, но и свободного перемещения людей.

В зданиях малой этажности светораспределение возможно по всей высоте. При этом объект является либо центральным ядром в окружающем пространстве, либо замыкает его, что определяет общие композиционные качества постройки и окружения, а также направленность и мотивацию перемещения зрителей.

В зданиях средней этажности при размещении в линии сплошной застройки улиц (с примыканием пешеходных зон непосредственно к цоколю) удобными зонами восприятия явля-

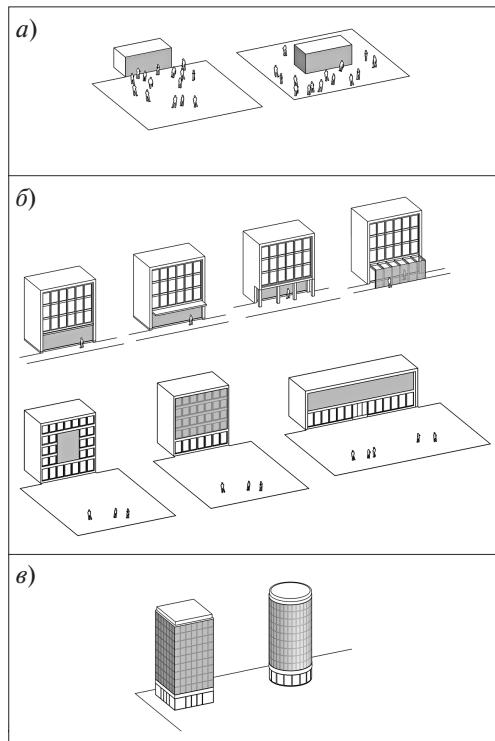


Рис. 2. Включение области интерактивного освещения в структуру здания (варианты):  
а — здания малой этажности; б — здания средней этажности; в — многоэтажные здания

ются нижние ярусы, витрины, переходы и пр. В соответствии с этим световые приборы и дополнительное оборудование устанавливаются в навесах, козырьках, простенках, элементах

остекления и т. д. Здесь целесообразно использование циклического принципа организации интерактивного взаимодействия, поскольку световое поле находится в прямой доступности для проходящих людей.

Если пространственные характеристики позволяют иметь достаточный резерв территории для восприятия издалека, размещение световой области допустимо и в вышележащих уровнях здания. Это также относится к многоэтажным объемам, которые в ряде случаев являются доминантами городского пространства. В данной ситуации предпочтителен выбор линейной схемы, при которой воздействие определяется внешними условиями и программным управлением режимом подсветки. Создавая акцентные световые объемы, важно помнить и соблюдать требования к качеству освещения, не искажать привычную для человека среду чрезмерной яркостью и частотой динамики подсветки.

В качестве вывода следует отметить, что решения с использованием интерактивного режима освещения начинают обращать на себя все большее внимание специалистов светодизайна, проектировщиков, ученых. Безусловно, они является одной из предпосылок развития «разумной», динамичной и универсальной архитектуры XXI века. Данная работа — попытка изучить механизмы этого новаторского явления, понять, какие критерии определяют практическое применение интеллектуальных систем освещения в архитектурном проектировании.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев, Н.М. Световая архитектура / Н.М. Гусев, В.Г. Макаревич. — М.: Стройиздат, 1973. — С. 160–163.
2. Щепетков, Н.И. Световой дизайн города / Н.И. Щепетков. — М.: Архитектура-С, 2006. — С. 161.

УДК 532 (075.8)

*М.Р. Петриченко, М.В.Петроченко*

## ДОСТАТОЧНЫЕ УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ЩЕЛЕВОМ КАНАЛЕ

Восходящее течение воздуха в щелевых каналах с параллельными стенками встречается во многих ограждающих строительных конструкциях. В качестве примеров таких конструкций

можно назвать навесные фасадные системы с вентилируемым воздушным зазором, кирпичные стены с вентилируемыми воздушными проложками, экранная тепло-влагозащита железо-



бетонных башенных градирен и др. Конструкции с вентилируемой воздушной прослойкой широко применяются в строительной практике. Опыт показывает, что вследствие применения воздушных прослоек в ограждающих конструкциях зданий и сооружений значительно повышаются эксплуатационные свойства и долговечность материалов самой конструкции. Расчет параметров течения воздуха в вертикальных каналах с вентилируемой воздушной прослойкой (зазором) весьма важен для практики.

Течение воздуха в вертикальном вентилируемом канале — свободноконвективное. Свободная конвекция, возникающая в поле силы тяжести, обусловлена существованием отрицательного градиента плотности воздуха, связанного с градиентом температуры (что отражается уравнением состояния и энергии или условием баротропности). Свободная конвекция — один из наиболее экономичных и практических методов удаления влаги из воздушного зазора. Если температура поверхности выше температуры окружающей среды, то поток воздуха, омывающего поверхность, нагревается и, становясь более легким, начинает всплывать. В этом случае менее плотные соседние слои воздуха замещают поднявшийся слой. Этот принцип замещения слоев воздуха используется при проектировании воздушных прослоек. При охлаждении нагретого тела окружающим воздухом такое течение наблюдается в области, вокруг этого тела.

Свободноконвективное течение в виде восходящего потока воздуха может быть ламинарным или турбулентным. Числа Релея, определяющие переход от ламинарного режима к турбулентному свободноконвективному течению, различны для вертикальной пластины и призматического (плоского) канала, образованного двумя параллельными поверхностями.

Пусть свободноконвективное течение (СКТ) осуществляется в вертикальном канале — прямоугольнике  $\Pi = (y, z: 0 < y < h; 0 < z < L)$ ,  $h \ll L$  (рис. 1). Контрольный объем выделен на рис. 1 пунктиром.

Он охватывает канал (вертикальная щель) и простирается снизу от нулевой отметки до плоскости  $z = L$ , проходящей несколько выше выходного среза канала в неподвижном воздухе.

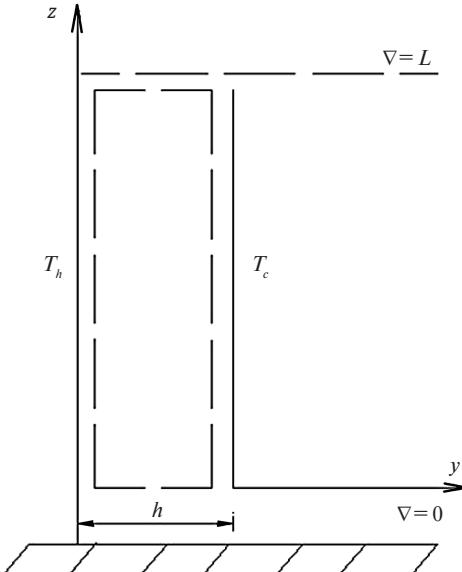


Рис. 1. Схема обогреваемого щелевого вертикального канала

Предполагается, что втекание в канал  $\Pi$  — безударное, вход в канал воздуха — продольный, вертикальный, безударный, для этого — одна из стенок канала (на рис. 1 — правая) несколько вынесена вверх. Выход из щели — свободный, в атмосферу. Потери напора на выход можно оценить по формуле Борда. Потери напора по длине известны (или допускают правдоподобную оценку). Для такого канала с небольшой погрешностью можно оценить коэффициент

$$\text{скорости по формуле } \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda \frac{L}{h}}}, \text{ где } \lambda \text{ — ко-}$$

эффициент гидравлического трения (число Дарси). Правая грань ( $y = h$ ) охлаждена и поддерживается при температуре  $T_c$ , меньшей, чем температура  $T_h$  левой грани ( $y = 0$ ). Известна интегральная интенсивность теплообмена (число Стентона  $St$ ) между свободно-конвективным потоком и стенками щели. Давление на отметке  $z = 0$  равно  $p_0$ , давление на отметке  $z = L$  равно  $p_1$ , причем  $p_0 > p_1$ . Требуется оценить среднюю скорость в свободно-конвективном течении. Под  $T$  далее понимается температура потока (средняя или средняя по энталпии). Решение основано на следующих предпосыпках:

1. В адиабатной щели СКТ отсутствует. Значит, если считать движение баротропным и заменить условие теплообмена (дифференциаль-

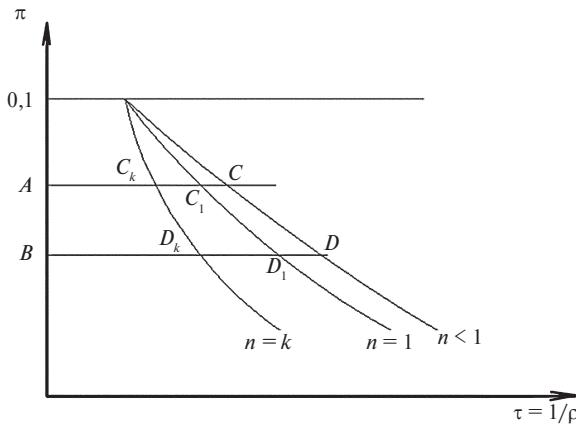


Рис. 2. Техническая работа расширение газа в канале

ное уравнение энергии) голономным условием баротропности, то  $\nu = 0, n = k$ .

2. Расширение газа в СКТ происходит при  $n < k$ ; если  $1 < n < k$ , то расширение газа с подводом теплоты сопровождается его охлаждением. СКТ — неустойчивое. Если же  $0 < n < 1$ , подвод теплоты столь интенсивен, что температура газа по длине щели растет, СКТ устойчиво по всей длине (высоте) щели.

3. Обобщая: если равновесному состоянию газа в вертикальном канале отвечает показатель политропы  $n = n_{\text{ex}} > 0$ , то при всяком значении  $0 < n < n_{\text{ex}}$  существует СКТ.

Действительно, расширение газа в СКТ изображается траекторией (политропой) на плоскости переменных  $(\pi, \tau = \frac{1}{\varrho})$  (рис. 2).

Площадь между осью  $\tau = 0$  и политропой изображает так называемую «техническую работу» расширения. Если  $n = k$ , то работа недостаточна для перемещения (подъема) газа в вертикальной щели и превращается в потенциальную энергию покоящегося столба газа. Если  $n < k$ , возникает профицит работы, реализуемый в кинетической энергии потока газа. Чем больше разность  $k - n$ , тем больше профицит и выше средняя скорость в СКТ. В условиях СКТ возможны оба неравенства. Если  $1 < n < k$ , то расширение газа при СКТ сопровождается его охлаждением, как, например, при движении в печной трубе (подвод теплоты от топочного пространства недостаточен для расширения с увеличением температуры по длине дымохода). Если  $0 < n < 1$ , подвод тепло-

ты обеспечивает монотонный рост температуры газа по длине канала. Такая ситуация характерна для обогреваемых каналов, например для воздуховода фасада.

Итак, утверждается, что

$$\forall \pi := \frac{p_1}{p_0} \in (0, 1), \quad \forall n < k,$$

$$\frac{k}{k-1} \left( 1 - \pi^{\frac{k-1}{k}} \right) < \frac{n}{n-1} \left( 1 - \pi^{\frac{n-1}{n}} \right),$$

причем

$$n \rightarrow 1; \quad \frac{n}{n-1} \left( 1 - \pi^{\frac{n-1}{n}} \right) \rightarrow \ln \frac{1}{\pi}.$$

Если  $n < 1$ , то

$$\frac{n}{n-1} \left( 1 - \pi^{\frac{n-1}{n}} \right) = \frac{n}{1-n} \left( \left( \frac{1}{\pi} \right)^{\frac{1-n}{n}} - 1 \right).$$

4. В условиях адиабатного равновесия столба газа в щели уравнение равновесия (уравнение Эйлера) имеет вид

$$\left( \frac{dp}{\rho} \right)_s + g \, dz = 0, \quad (1)$$

где индекс  $s$  подчеркивает адиабатность статического состояния газа.

При наличии подвода теплоты уравнение равномерного движения имеет вид

$$\left(\frac{dp}{\rho}\right)_n + g \, dz + g \, dh_f = 0. \quad (2)$$

Здесь индекс *n* отмечает баротропность подвода теплоты при СКТ. Можно представить себе, что подвод теплоты, создающий мощность подъемной (архимедовой) силы, заменяется «распределенным по высоте щели насосом» (источником механической мощности), перемещающим воздух в щели адиабатно. Тогда

$$\left( \frac{dp}{\rho} \right)_s + g \, dz + g \, dh_f = dh_p, \quad (3)$$

где  $h_p$  — напор «насоса», создающего адиабатный поток, эквивалентный по средней скорости СКТ в обогреваемом канале.

Формула (3) допускает простую интерпретацию: если перемещение «холодного» газа в ка-



нале снизу вверх осуществляется насосом (вентилятором), то напор насоса (вентилятора) должен обеспечивать подъем газа и компенсировать потери напора. Из (3) и (1) получается  $dh_p = dh_f$ . При этом

$$gh_f = \left(1 + \lambda \frac{L}{h}\right) \frac{v^2}{2} = \frac{v^2}{2\varphi^2},$$

где  $\varphi = \sqrt{1 + \lambda \frac{L}{h}} \leq 1$  — коэффициент скорости.

В силу (1), (2)

$$\left(\frac{dp}{\rho}\right)_n - \left(\frac{dp}{\rho}\right)_s + g dh_f = 0.$$

Тогда

$$\frac{n}{n-1} \left(1 - \pi^{\frac{n-1}{n}}\right) - \frac{k}{k-1} \left(1 - \pi^{\frac{k-1}{k}}\right) = \frac{v^2}{2\varphi^2 RT_0},$$

или

$$\frac{n}{n-1} \left(1 - \pi^{\frac{n-1}{n}}\right) - \frac{gL}{RT_0} = \frac{v^2}{2\varphi^2 RT_0};$$

$$\frac{n}{n-1} \left(1 - \left(1 - \frac{k-1}{k} \Lambda\right)^{\frac{k(n-1)}{n(k-1)}}\right) - \Lambda = \frac{\beta^2}{2\varphi^2};$$

$$\beta = \frac{v}{\sqrt{RT_0}}; \quad \Lambda = \frac{gL}{RT_0},$$

причем в реальных технических устройствах  $\Lambda \ll 1$ . Для дальнейшего достаточно, чтобы  $\Lambda \leq \frac{k}{k-1}$ .

5. Применение формулы бинома упрощает определение средней скорости. Действительно:

$$\begin{aligned} & \frac{n}{n-1} \left(1 - \left(1 - \frac{k-1}{k} \Lambda\right)^{\frac{k(n-1)}{n(k-1)}}\right) - \Lambda = \\ & = \frac{n}{n-1} \left(1 - \left(1 - \frac{n-1}{n} \Lambda + \left(\frac{k-1}{k}\right)^2 \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times \frac{\Lambda^2 k(n-1)}{2 n(k-1)} \frac{(n-k)}{n(k-1)} + O(\Lambda^3)\right)\right) - \Lambda = \end{aligned}$$

$$= \frac{\Lambda^2}{2} \frac{k-n}{nk} = \frac{\Lambda^2}{2} \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{k}\right).$$

Следовательно,

$$\beta = \varphi \Lambda \sqrt{\frac{1}{n} - \frac{1}{k}} \quad \text{при} \quad 0 < n \leq k, \quad (4)$$

или

$$v = \varphi \frac{gL}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\frac{1}{n} - \frac{1}{k}}. \quad (5)$$

Очевидно, что  $\beta \xrightarrow{n \rightarrow 1} \varphi \Lambda \sqrt{\frac{k-1}{k}}$  и  $\beta \xrightarrow{n \rightarrow 0} \infty$ .

Формула (5) решает поставленную задачу. Она приводит к правдоподобным оценкам средней скорости течения в выходном сечении щели. Например, пусть  $k = 1,4$ ;  $n = 1,3$ ;  $T_0 = 300$  К;  $\varphi = 0,6$ ;  $L = 100$  м. Тогда в силу (5)  $v = 0,48$  м/с. График функции  $v = v(n)$  для этих условий  $k \geq n > 0$  приведен на рис. 3. Уменьшение  $n$  до значения 0,9 (увеличение интенсивности теплообмена на горячей грани) при прочих неизмененных данных увеличивает скорость до 1,29 м/с.

6. Показатель политропы  $n$  связан с интенсивностью теплопередачи в СКТ тождеством

$$\frac{n-k}{k(n-1)} \frac{dT}{d\zeta} = St(T_h - T), \quad \zeta = \frac{z}{h}, \quad (6)$$

причем  $T$  — температура потока в щели. Значит,

$$n = \frac{k(s-1)}{sk-1}; \quad s = St \frac{d\zeta}{d \ln \frac{1}{1-\vartheta}}; \quad \vartheta = \frac{T}{T_h} \leq 1. \quad (7)$$

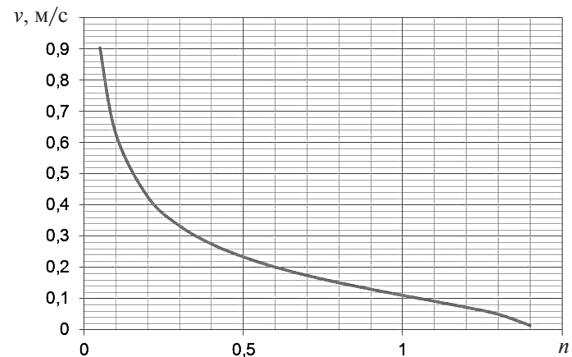


Рис. 3. Влияние теплообмена (показателя политропы  $n$ ) на среднюю скорость СКТ в щели



Очевидно:  $1 < n < k$ , если  $s < 0$ , т. е. в случае убывания температуры по длине щели. Если же  $0 < n < 1$ , то  $s > 1$ , т. е. в случае увеличения температуры по длине щели. График зависимости  $n = n(s)$  приведен на рис. 4.

Полученное тождество демонстрирует связь показателя политропы  $n$  с интенсивностью переноса теплоты на горячей грани канала. Если распределение температуры по высоте (длине) потока в СКТ известно, то известно и значение (локальное) показателя  $n$  политропы. Поэтому понятно, что условие баротропности течения заменяет дифференциальное уравнение передачи теплоты потоку, на что указывал К.И. Страхович [1].

Политропное распределение температуры по длине канала имеет вид

$$\begin{aligned}\tau &= \pi^{\frac{n-1}{n}} = \left(1 - \frac{k-1}{k}\zeta\right)^{\frac{k}{k-1}\frac{n-1}{n}} = 1 - \frac{n-1}{n}\zeta = \\ &= 1 - \frac{n-1}{n} \frac{gh}{RT_0} \frac{z}{h} = 1 - \frac{n-1}{n} \psi \bar{z},\end{aligned}$$

где

$$\psi = \frac{gh}{RT_0}, \bar{z} = \frac{z}{h}, \tau = \frac{T}{T_0}, \zeta = \frac{gz}{RT_0}, 0 < \zeta < \Lambda.$$

Тогда

$$n = \frac{1}{1 + \frac{d\tau}{d\zeta}} = \frac{1}{1 + \frac{R}{gh} \frac{dT}{d\bar{z}}}. \quad (8)$$

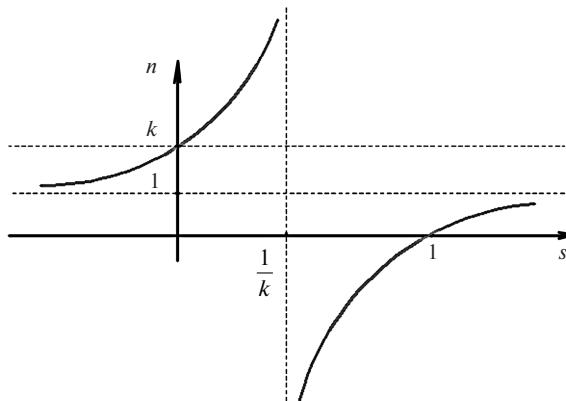


Рис. 4. График зависимости показателя политропы  $n$  от интенсивности теплопередачи в СКТ

Значит, если за счет подвода теплоты от горячей грани температура потока растет по длине канала (положительная теплоемкость процесса), то  $n < 1$ ; для убывающей по длине температуры потока  $n > 1$ . Для постоянной температуры  $n = 0$ .

Выражение (8) иллюстрирует голономность условия баротропности. В силу условия теплопередачи

$$\frac{dT}{d\bar{z}} = St(T_h - T), \quad (9)$$

где  $St$  — безразмерный коэффициент теплоотдачи (число Стантона). Тогда (8) принимает вид

$$n = \frac{1}{1 + \frac{RSt}{gh}(T_h - T)}. \quad (10)$$

При этом равномерно по  $z$  должно выполняться условие  $St(T_h - T) \xrightarrow[St \rightarrow \infty]{} 0$ . Тогда  $n \xrightarrow[St \rightarrow \infty]{} 1 \pm 0$ .

Для вычисления разности в дроби (10) необходимо решить уравнение теплопередачи (9). Пусть начальное условие для (9) имеет вид  $T = T_0$ . Тогда при постоянных  $T_h$  и  $St$  знак разности  $T_h - T$  постоянен. Поэтому либо  $n > 1$ , либо  $n < 1$ . Решение задачи Коши для (9):

$$T = T_0 \exp(-B(\bar{z})) + \exp(-B(\bar{z})) \times$$

$$\times \int_0^{\bar{z}} T_h(x) St(x) \exp(B(x)) dx,$$

где

$$B(\bar{z}) = \int_0^{\bar{z}} St(x) dx \geq 0; \quad B(0) = 0; \quad St(\bar{z}) = \frac{dB}{d\bar{z}}.$$

Значит,

$$T_h(\bar{z}) - T(\bar{z}) = T_h - T_0 \exp(-B(\bar{z})) -$$

$$- \exp(-B(\bar{z})) \int_0^{\bar{z}} T_h(x) St(x) \exp(B(x)) dx; \quad (11)$$

$$n = \frac{1}{1 + \frac{RSt}{gh}(A)};$$

$$A = T_h(\bar{z}) - T_0 \exp(-B(\bar{z})) - \exp(-B(\bar{z})) \int_0^{\bar{z}} T_h(x) St(x) \exp(B(x)) dx$$



$$\times \int_0^{\bar{z}} T_h(x) St(x) \exp(-B(x)) dx.$$

Формула (11) уточняет (7).

В ряде случаев формула (11) допускает упрощения:

а) например, пусть  $St = \text{const}$ . Значит,

$$B(\bar{z}) = St \bar{z}, \quad T(\bar{z}) = T_0 \exp(-St \bar{z}) + \\ + St \int_0^{\bar{z}} T_h(\bar{z} - x) \exp(-St x) dx.$$

Но

$$T_h(\bar{z} - x) = \exp\left(-x \frac{d}{d\bar{z}}\right) T_h(\bar{z}).$$

Поэтому

$$T(\bar{z}) = T_0 \exp(-St \bar{z}) + \left( I + \frac{1}{St} \frac{d}{d\bar{z}} \right)^{-1} T_h(\bar{z}) = \\ = T_0 \exp(-St \bar{z}) + T_h(\bar{z}) - \frac{1}{St} \frac{dT_h}{d\bar{z}} + O(St^{-2}).$$

Тогда выражение (11) для показателя политропы  $n$  принимает вид

$$n = \frac{1}{1 + \frac{RSt}{gh} \left( \frac{1}{St} \frac{dT_h}{d\bar{z}} - \frac{1}{St^2} \frac{d^2 T_h}{d\bar{z}^2} + \dots - T_0 \exp(-St \bar{z}) \right)}. \quad (12)$$

Выражение (12) при условии, что  $\left| \frac{d}{d\bar{z}} \right| < St$ ,

моделирует ситуацию с постоянной плотностью теплового потока на горячей грани. Знак разности в знаменателе (12) не определен, и уравнение  $n = 1$  может иметь корень.

б) Еще один предельный случай отвечает постоянной вдоль длины температуре горячей грани. Ему соответствует равенство

$$T_h - T = (T_h - T_0) \exp(-B(\bar{z})).$$

Поэтому

$$n = \frac{1}{1 + \frac{RSt}{gh} (T_h - T_0) \exp(-B(\bar{z}))}. \quad (13)$$

в) Если постоянны и теплоотдача от горячей грани, и температура горячей грани, то формула (13) превращается в формулу Ньютона:

$$n = \frac{1}{1 + \frac{RSt}{gh} (T_h - T_0) \exp(-St \bar{z})}. \quad (14)$$

Формула (13) свидетельствует, что в канале с изотермической горячей гранью показатель политропы всегда удовлетворяет неравенству  $n \geq 1$ .

Таким образом, чтобы рассчитать среднюю скорость в щели, необходимо в первом приближении оценить значение  $n$ . Например, можно взять  $n = 1$ . Затем определяют среднюю скорость по формуле (5), с помощью тех или иных эмпирических зависимостей [2] вычисляют коэффициент теплообмена (теплопередачи) и уточняют значение показателя политропы. И т. д. до сходимости.

7. Существует еще одно простое соображение, касающееся оценки показателя политропы. Массовая скорость СКТ,  $w = \rho v$ , постоянна по высоте щели. Значит, в силу (1) и условия неразрывности ( $w = \rho v = \rho_0 v_0 = \text{const}$ ) будет

$$\beta_0 = \pi^n \beta = \varphi \Lambda \sqrt{\frac{1}{n} - \frac{1}{k}} \left( 1 - \frac{k-1}{k} \Lambda \right)^{\frac{k}{n(k-1)}}. \quad (15)$$

Из (15) очевидно, что скорость по высоте щели увеличивается незначительно, примерно в  $1 + \frac{\Lambda}{n}$  раз. Во столько же раз уменьшается плотность по высоте щели. Для стометровой щели в условиях рассмотренного примера  $\Lambda = 0,012$ , и, соответственно, изменение скорости по высоте щели составляет порядка 1 %. На самом деле, вертикальный градиент скорости мал (0,01 % на метр высоты щели), и допущение о плавном изменении течения по средней скорости вполне оправдано. Из формулы (6) легко получить, что максимальное значение массовой скорости в канале (канал «гидравлически наивыгоднейшей длины») достигается, если

$$\Lambda \left( \frac{k-1}{k} + \frac{1}{n} \right) = 1,$$

$$\text{т. е. } \frac{1}{n} = \frac{1}{\Lambda} - \frac{k-1}{k}; \quad n = \frac{\Lambda}{1 - \frac{k-1}{k} \Lambda} = \Lambda + O(\Lambda^2).$$

Очевидно, для реальных размеров щелей (порядка 100 м) величина  $\Lambda \ll 1$ , и зависимость показателя политропы от длины «гидравлически



наивыгоднейшей» щели практически линейная (рис. 5, б). В реальных технических устройствах  $\Lambda \ll 1$ , поэтому  $n = \Lambda + O(\Lambda^2)$ . Получается: чем меньше высота канала, тем более интенсивная передача теплоты необходима для достижения наибольшей массовой скорости. При этом, как правило,  $0 < n < 1$ .

Следовательно, достаточное условие существования СКТ в вертикальной щели имеет вид:  $n < n_e$ , где  $n_e$  — значение показателя политропы, отвечающее состоянию равновесия вертикального столба газа. Значение показателя политро-

пы  $n$  в равномерном и баротропном СКТ практически пропорционально длине канала. Иначе: чем короче канал, тем больше должна быть величина теплового потока, создающего вертикальную тягу, и наоборот.

Усиление достаточного (слабого) условия существования СКТ до необходимого и достаточного связано с изучением «тонкой» структуры потока [3]. В этом случае вместо грубого гидродинамического условия баротропности необходимо решать дифференциальное уравнение теплопередачи, т. е. точно реализовывать схему, намеченную в пункте 7.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Страхович, К.И. К вопросу об одноразмерном установившемся движении газа в трубах [Текст] / К.И. Страхович // ПММ. 1933.— Т. 1. №1.— С. 47–50. (Цит. по: К.И. Страхович. Гидро-газодинамика.— М.: Наука, 1980. С. 102–105.)

2. Соковишин, Ю.А. Свободно-конвективный теплообмен [Текст]: Справочник. Ю.А. Соковишин,

О.Г. Мартыненко.— Минск: Наука и техника, 1982.— 400 с.

3. Чумаков, Ю.С. Экспериментальное исследование свободноконвективных течений около вертикальной поверхности [Текст] / Ю.С. Чумаков // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского политехнического университета.— 2004. № 2 (36).— С. 103–116.

УДК 621.21.9

В.А. Мишаков, Л.Н. Синяков,  
В.А. Соколов, Д.А. Страхов

## ИНЖЕНЕРНО-ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ТЭЦ

На протяжении нескольких лет специалисты инженерно-строительного факультета СПбГПУ совместно с сотрудниками ООО «НПСФ СпецСтройСервис» проводили работы по диагностике технического состояния зданий и сооружений промплощадки Северо-Западной ТЭЦ (СЗ ТЭЦ) в г. Санкт-Петербурге. Высокая значимость этих объектов всегда накладывала на организацию и проведение обследований повышенные требования. Это было особенно актуально тогда, когда в процессе длительной эксплуатации в конструктивных элементах зданий и сооружений стали проявляться различные повреждения. Для таких объектов при выполнении обследований следовало разработать мероприятия по проведению всех работ без остановки технологического

цикла, т. е. в условиях их непрекращающейся эксплуатации. Кроме того, весь комплекс работ должен был выполняться в рамках нормативных требований, соответствующих уровню детально-го инструментального обследования [1, 2].

На некоторых объектах одним из решающих этапов, позволивших с уверенностью установить первопричины образовавшихся повреждений, оказалась серия поверочных расчетов для принятия научно обоснованных решений по приведению этих объектов в нормальное эксплуатационное состояние. В ряде случаев потребовалось провести многовариантный численный эксперимент, согласованный с измерениями на натуре, причем без нарушения режима функционирования здания.

Одним из таких объектов стало отдельно стоящее здание, входящее в состав комплекса сооружений спецводоочистки (СВО) С3 ТЭЦ. Поводом для проведения его обследования стали повреждения в виде визуально фиксируемых и прогрессирующих трещин, проявившихся преимущественно в верхней части наружных, ограждающих здание, кирпичных стен.

Здание характерно тем, что в нем расположены четыре очистных резервуара в виде вертикально установленных стальных цилиндрических емкостей с водопроводящими системами

их заполнения и опорожнения. Общий вид здания представлен на рис.1. Здание имеет квадратную планировочную компоновку со скругленными углами. План здания (схема) с указанием генеральных плановых размеров и сетки координационных осей дан на рис. 2. Как видно, общие размеры в плане составляют величину  $\sim 22,3 \times 22,3$  м, расстояние между осями резервуаров — 12,0 м, диаметр резервуара — 9,0 м. Ограждающие стены здания — кирпичные, имеющие толщину 380 мм. По высоте здание скомпоновано таким образом, что резервуары практичес-



Рис. 1. Общий вид здания

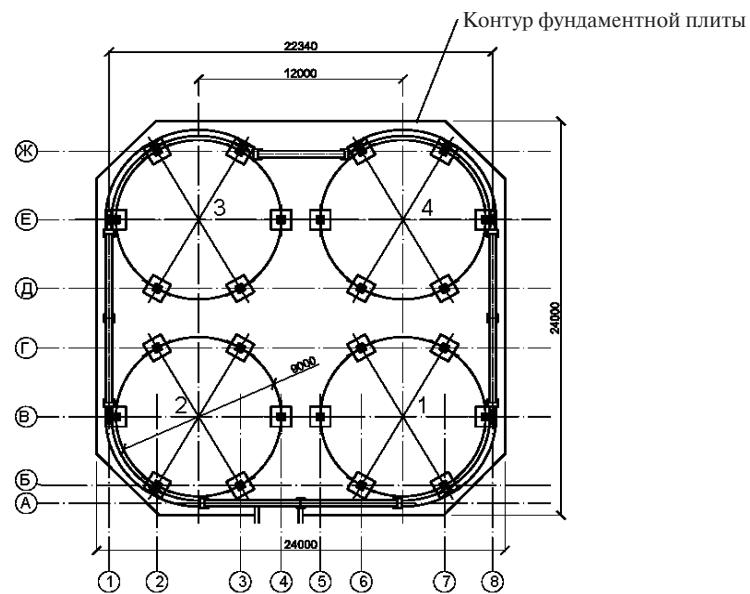


Рис. 2. План здания (схема)



ски на всю высоту возвышаются над его стенами и кровлей. Отметка верха резервуаров примерно 17,5 м, отметка верха кровли здания — 9,2 м. Резервуары своими опорными ребрами установлены на кольцевые монолитные железобетонные балки прямоугольного поперечного сечения (600×750 мм) с консольными выступами в верхней части длиной 170 мм. Каждая кольцевая балка опирается на шесть сборных железобетонных колонн также прямоугольного поперечного сечения (400×500 мм), которые в свою очередь опираются на монолитные подколонники фундаментной плиты. Отметка верха каждой балки принята равной отметке верха плиты покрытия здания (9,15 м).

Несущее покрытие здания выполнено в виде плоской монолитной фигурной плиты толщиной 80 мм, опирающейся на стены и балочную клетку из стальных двутавровых профилей.

Фундаментом здания служит расположенная под ним сплошная монолитная железобетонная плита толщиной 600 мм. Размеры фундаментной плиты в плане — 24,0×24,0 м, глубина заложения ее подошвы от уровня дневной поверхности — 1,95 м (рис. 3).

На плите выполнены подколонники из монолитного железобетона для колонн опорных конструкций резервуаров. На эту же фундаментную плиту опираются и наружные кирпичные стены. Исключение составляют лишь участки стен вдоль осей 1–8 и А — Ж, где, как было установлено в ходе изучения проектной документации, кирпичная кладка стен опирается на фундаментные балки, концы которых уложены на

подбетонки, выполненные на фундаментной плите. По результатам обследования из проходившего шурфа установлено, что элементы конструкции фундамента здания повреждений не имеют. Техническое состояние по выявленным диагностическим признакам — второе, т. е. работоспособное [1, 2]. Установившийся уровень грунтовых вод в шурфе находился на глубине 1,25 м от уровня дневной поверхности, т. е. выше отметки подошвы фундаментной плиты.

Грунтовые условия под подошвой фундаментной плиты были определены на основании анализа результатов изысканий, выполненных институтом «Атомэнергопроект». Установлены следующие инженерно-геологические элементы (слои), залегающие сверху вниз от уровня подошвы фундаментной плиты:

суглинок ленточный слоистый с редкими прослойками песка пылеватого, полутвердый (слой 6 мощностью 1,4 м);

суглинок ленточный слоистый с редкими прослойками песка, мягкопластичный (слой 7 мощностью 0,7 м);

супесь с включениями гравия и гальки до 20 %, твердая (слой 12 мощностью 0,5 м);

супесь с включениями гравия и гальки до 15 % с линзами песка пылеватого, пластичная (слой 13 мощностью 2,7 м);

супесь с включениями гравия и гальки до 20 %, твердая (слой 12 мощностью 7,8 м до глубины 15 м — глубины забоя изыскательской скважины).

По результатам изысканий были также определены необходимые для выполнения поверочных расчетов нормативные и расчетные значения физико-механических характеристик указанных грунтов.

В ходе комплексного инженерно-диагностического обследования конструкций надземной части здания было установлено следующее:

1. Как отмечено выше, несущими элементами для опирания резервуаров служат кольцевые балки прямоугольного поперечного сечения, имеющие консольные выступы. Установлено, что эти выступы на криволинейных участках кирпичной стены практически вплотную примыкают к внутренней поверхности кладки. Очевидно, что любые незначительные деформации или перемещения кольцевой балки вполне могут

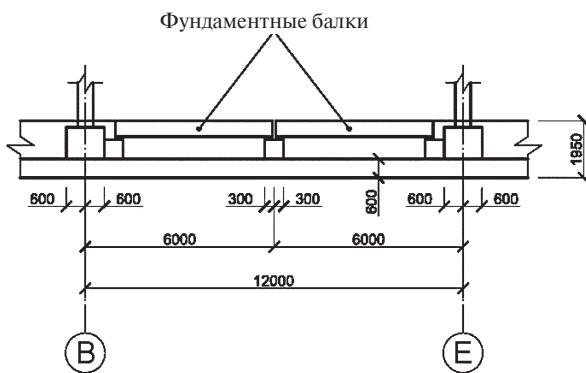


Рис. 3. Конструкция фундамента здания с фундаментными железобетонными балками по оси 8 между осями В и Е



привести к деформациям и даже повреждениям кирпичной кладки стен в местах контакта.

2. Условия опирания единой замкнутой кирпичной стены оказались различными. Криволинейные участки опираются на фундаментную плиту непосредственно, а прямолинейные — на фундаментные балки. Такое различие в условиях опирания вполне могло привести к неравномерным деформациям элементов опорного контура, что также могло стать причиной образования трещин в самой стене.

3. Трещины, образовавшиеся преимущественно в верхней части кладки стены, имеют систематический характер, не являются сквозными, но проходят и по шву, и по кирпичу. Видно (рис. 4), что они имеют практически вертикальную ориентацию и ширину раскрытия, увеличивающуюся снизу вверх.

4. Для оценки прочностных характеристик кирпичной кладки были проведены исследования этих показателей неразрушающими методами. Прочность кирпича определялась импульсным ультразвуковым методом в соответствии с ГОСТ 17624–87 и склерометрическим методом, а прочность раствора — только склерометрическим методом. Исследования прочности кладки выполнялись в зонах образования наиболее значительных трещин. Предел прочности кирпичной кладки на сжатие для каждой зоны определялся по значениям предела прочности кирпича и раствора в соответствии с нормированной формулой профессора Л.Н. Онищика. По результатам расчетов округленное значение расчетного сопротивления кладки, определенное по среднему значению предела прочности, составило 13,0 кгс/см<sup>2</sup>.

5. В ходе эксплуатации на наиболее характерные трещины были установлены маяки, в которых, по свидетельству обслуживающего персонала СВО, постоянно появляются трещины. Это особенно заметно во время технологических операций, связанных с наполнением или опорожнением резервуаров.

В связи с вышеизложенным в ходе обследования по согласованию с эксплуатационными службами здания СВО было принято решение организовать и провести натурный эксперимент, по программе которого наполнение и опорожнение резервуаров водой проходило в определенном, заранее заданном порядке. При

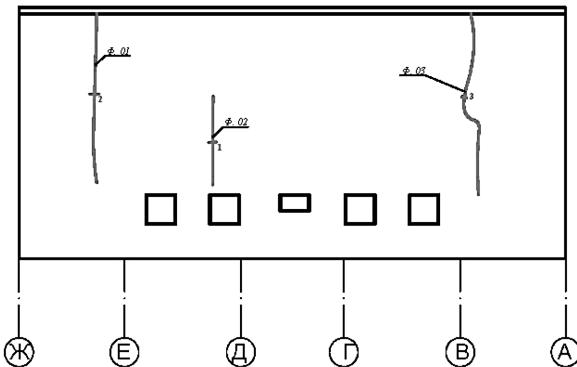


Рис. 4. Схема расположения повреждений в стене фасада по оси 1

прохождении этой процедуры наблюдение за поведением трещин осуществлялось с использованием установленных на трещины индикаторов часового типа, а измерение общих деформаций здания проводилось с использованием геодезических приборов. По результатам проведенных натурных исследований было установлено, что поведение указанных наиболее значительных трещин зависит от режимов заполнения обоих резервуаров. Так, по данным измерения перемещений с помощью индикаторов часового типа установлено увеличение ширины раскрытия трещин в стене вблизи пересечения осей 1 — В (на 0,81 мм) и 8 — В (на 0,65 мм), а в маяках, установленных на эти трещины, образовались волосяные трещины практически сразу после заполнения водой обоих резервуаров (№№ 1 и 2). Наибольшие вертикальные перемещения при последовательном заполнении этих двух резервуаров (до 5 мм) зафиксированы по результатам нивелирования отметок стенных марок, установленных вблизи резервуара № 1 (рис. 5).

По результатам натурных геодезических измерений осадок основания и фундаментной плиты при разновариантном заполнении водой резервуаров до максимального уровня (двух или одного из четырех) распределение осадок фундамента оказалось существенно неравномерным.

Для подтверждения этого вывода была выполнена серия поверочных расчетов. Во-первых, в соответствии со СНиП 2.02.01–83\* [4] было вычислено расчетное сопротивление грунта осно-

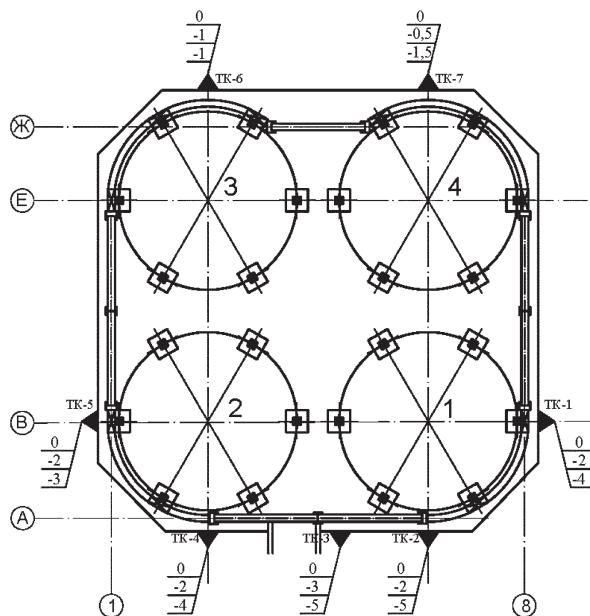


Рис. 5. Изменение отметок геодезических марок при заколнении резервуаров

вания фундаментной плиты, получившееся равным  $R = 44,1$  тс/м<sup>2</sup>. Далее было определено среднее давление под подошвой плиты при полностью заполненных водой резервуарах —  $p = 6,5$  тс/м<sup>2</sup>. Таким образом, условие [4], по которому  $p$  не должно превышать  $R$ , как видим, выполнено. Полученное соотношение  $p < R$  позволило далее использовать в расчетах деформаций основания расчетную модель в виде линейно деформируемого полупространства. При использовании в расчетах вычислительно-го комплекса SCAD применение этой модели стало основой построения расчетной схемы грунтового массива с помощью объемных конечных элементов. При проведении расчетов деформационные характеристики слоев грунта назначались в соответствии с натурными данными инженерно-геологических изысканий. Результаты расчета осадок показали удовлетворительное качественное и количественное согласование с результатами геодезических измерений, проведенных в ходе натурного эксперимента.

Выполненный объем полевых работ и результаты обработки полученных данных в камеральных условиях вместе с результатами серии проведенных поверочных расчетов по-

зволили установить, что образование и развитие трещин в наружных стенах здания обусловлено комплексом причин, основные из которых — следующие:

при неодинаковом заполнении водой четырех резервуаров распределение осадок фундаментной плиты существенно неравномерно, что, несмотря на значительную толщину плиты, приводит к ее изгибу и неравномерным деформациям кирпичных стен здания;

железобетонные кольцевые балки при нецентрированном опирании стенок резервуаров с водой могут испытывать кручение и сопровождаться касанием консольными участками кирпичных стен, а соответственно, передачей боковых усилий на эти стены;

значительная разность температур на внутренней и наружной поверхностях стен здания в холодный период года в замкнутых объемах приводит к появлению растягивающих напряжений на наружной поверхности стен и к трещинообразованию кирпичной кладки;

не исключено, что неравномерным деформациям единой замкнутой кирпичной стены способствуют также различные условия ее опирания на фундаментную плиту. Как видно из рис. 2, 3, изменение условий опирания имеет место на пересечении осей В — 1, Е — 1 и В — 8, Е — 8, т. е. на тех участках, вблизи которых и образовались наиболее значительные трещины.

В итоге по результатам обследования были сформулированы предложения по изменению очередности наполнения и опорожнения резервуаров, т. е. по корректировке существующей на предприятии технологической схемы функционирования элементов системы спецводоочистки.

Отмечено также, что зафиксированные трещины на момент обследования не представляют опасности для несущей способности стены, однако с течением времени их развитие может привести к разделению кирпичной кладки стены на отдельные фрагменты и потере их устойчивости.

Результаты выполненной работы стали основанием для проведения комплекса научно обоснованных мероприятий по усилению кладки стен здания, а также для организации наблюдений за их деформациями во время проведения работ по усилению и после их завершения. Для этого были разработаны соответствующие про-



ектные решения, которые удалось реализовать в достаточно короткие сроки. Кроме того, было отмечено, что в случае продолжения деформаций следует выполнить работы по укреплению грун-

тового основания. Однако результаты проведенных в течение длительного времени наблюдений показали, что после усиления кладки стен развитие трещин практически прекратилось.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 53778–2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния [Текст].— М: Стройиздат, 2010.— 90 с.
2. СП 13–102–2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. Свод правил по проектированию и строительству. [Текст] / М: Госстрой России. ГУЛ ЦПП.— М, 2003.— 28 с.
3. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01–83) [Текст] / НИИОСП им. Герсеванова // М.: Стройиздат, 1986.
4. СНиП 2.02.01–83\*. Основания зданий и сооружений [Текст] / Госстрой России.— М., 2001.
5. ТСН 50–302–2004. Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге [Текст].— СПб., 2004.
6. СНиП П-22–81. Каменные и армокаменные конструкции [Текст] // М: Стройиздат, 1983.
7. Пособие по проектированию каменных и армокаменных конструкций (к СНиП П-22–81) [Текст] // М.: Стройиздат, 1989.
8. СП 52–101–2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения [Текст] / Госстрой России.— М., 2004.



# ВОПРОСЫ ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 378.1

А.Н. Шевелёв

## ПРОБЛЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БАЗОВОГО И ПОСТДИПЛОМНОГО ПЕДАГОГИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ: ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

Педагогическое образование — ключевое звено образовательного реформирования в любой стране. Автор исходил из понимания педагогического образования как нераздельного единства его базового, постдипломного (профессиональное совершенствование) и профессионально-деятельностного (социальный статус, педагогическая деятельность и самообразование педагога) уровней.

Практически одновременно (вторая половина XIX века) во всех странах, включая Россию, за счет общественной инициативы начинает складываться постдипломное педагогическое образование в форме учительских съездов и курсов. Главными его чертами были недостаточный уровень системности, эпизодичность, общественный энтузиазм и гармоничность научно-теоретического и практического компонентов обсуждаемых проблем.

Можно сделать вывод о достаточно высокой степени привлекательности педагогической профессии в глазах общества, несмотря на противоречивые высказывания современников и историков. Уже в XIX веке в Европе складывалось понимание незавершенности подготовки педагога с получением им диплома о профессиональном образовании. Появление должностей зауряд-наставников в Англии, младших учителей в Германии, получение высшего свидетельства учителями Франции показывало, что квалификацию европейский педагог получал только после практического подтверждения своей профессиональной состоятельности. Для этого уже к концу XIX века складывалась система сертификаций, испытаний и дифференциации функций внутри учительской профессии. Это позволяло государ-

ству осуществлять отбор, стимулирование и контроль школьной системы через регламентацию системы подготовки педагогов. Но сам факт наличия конкурса на занятие учительских вакансий показывает, что уже к 1900 году в Европе сложились рынок педагогического труда и профессиональная конкуренция на нем, позволявшая отбирать наиболее подготовленных к реализации педагогической профессии лиц. Именно эта черта, за некоторыми исключениями, не нашла отражения в истории российского дореволюционного педагогического образования.

Во всех западных странах в первой половине XX века в различной степени проявлялись несколько общих проблем системы педагогического образования, заложенных еще в XIX столетии:

отношение к профессии педагога в обществе (социальный статус педагога), осознание обществом того, что проблемы школы неотделимы и полностью зависимы от качества педагогического образования, готовность молодежи идти в учреждения педагогического образования по призванию за счет социального стимулирования или иных преференций, соотношение обязанностей и прав педагога;

наличие двух разных по статусу групп педагогов — педагогов начальной и средней школы, получавших разное профессиональное образование (среднее специальное образование у педагогов начальной школы и университетское у педагогов школы средней), дискуссия об эффективности этих моделей (специалитета и университета), о достаточности среднего или необходимости высшего образования для всех школьных педагогов;



государственная политика в области педагогического образования, определявшая, какими профессиональными качествами должен обладать педагог и как в зависимости от этого должно строится содержание педагогического образования (свободная конкуренция на рынке педагогического труда или государственные контроль и регулирование как крайние модели насыщения школы качественно подготовленными педагогами);

приоритет практической или теоретической (академической) подготовки будущего педагога (критике подвергается либо его недостаточная готовность работать в реальном педагогическом секторе, оторванность от проблем практики либо, в противоположность, недостаточно глубокие по сравнению со студентами классических университетов научные знания и научно-мировоззренческие позиции, обделяющие, в конечном счете, учеников, недополучающих от такого учителя академические знания);

оптимальная модель осуществления эффективного постдипломного образования педагогов (от моделей наставничества более опытных педагогов и деятельности объединений школ, осуществляющих в числе прочего и повышение квалификации педагогов, до создания соответствующих структур в университетах и педагогических вузах).

Эти проблемы нашли в первой половине XX века отражение в виде моделей организации педагогического образования: государственной и общественно-частной, специальной или общеуниверситетской (практическая и академическая), мотивирующей и стимулирующей, базовой и постдипломной, индивидуально-личностной и массово-профессиональной.

В современном мире учится 1 млрд учащихся и работают 60 млн учителей. Современная мировая ситуация в области педагогического образования связана с осознанием острой необходимости его реформирования. Ведущей тенденцией, свойственной странам Запада, является критика университетов как центров педагогического образования и призывы к их модернизации. Последняя связывается с переходом к многоуровневой, модульной, практикоориентированной системе высшего образования (Болонский процесс), где основное — это выделение уровней бакалавриата и магистратуры, в том

числе и для высшего педагогического образования. Обосновывается значимость освоения будущим педагогом нескольких квалификаций (поливалентность подготовки). Процессы глобализации и интернационализации образования все больше включают в подготовку учителя поликультурный компонент. Но ведущим противоречием остается баланс между массовизацией учительской профессии и предъявляемым к ней со стороны общества и государства требованием нового качества (квалификация, компетентности)[6, 24].

Западные реформы образования в целом и педагогического образования в частности можно рассматривать на практике как непрерывную цепь действий, сопровождающуюся неизбежными пробами, ошибками, отказом от ранее предпринятых действий и апробацией новых вариантов решения старых проблем. Общность деклараций об учительстве как одной из наиболее престижных и значимых профессий в реальности часто сопровождается общностью осознания ее как одной из наиболее тяжелых. Декларации далеко не всегда соответствуют уровню зарплаты учительства. Но общим является понимание того, что глубокое реформирование образования без реформы системы непрерывного образования учителей немыслимо. В своем непонимании последнего тезиса современная Россия скорее составляет исключение.

Декларация ЮНЕСКО «Роль учителя в современном мире» (1996) наметила целый спектр проблем, общих для учительства самых разных стран. Особая проблема, с точки зрения авторов Декларации, — оптимизация системы постдипломного образования педагогов, которая может осуществлять свою деятельность либо в виде централизованной системы, либо как вариативно-модульное сопровождение повышения квалификации педагогов по отдельным практическим аспектам деятельности учителя. В любом случае авторы Декларации отдают предпочтение практическому применению получаемых педагогами в этих вариантах знаний и интерактивным формам их освоения. Спорным и вариативным остается в Декларации подход к финансированию повышения квалификации педагогов за счет государственного бюджета, средств самой школы или самого педагога (в ходе предоставляемого ему



для этих целей обязательного отпуска). В любом случае перенесение расходов на повышение квалификации учительства в западных странах с государства на школы или самих педагогов однозначно рассматривается в Декларации отрицательно, как неоправданная экономия государственных средств за счет системы образования [6, 68, 69].

В целом можно констатировать, что в зарубежных странах создание системы централизованного повышения квалификации педагогов исторически запаздывает относительно России. Эта тенденция стала не слишком активно проявляться только с 70-х годов как реакция на демографический взрыв, вызвавший рост потребности в учителях, что повлекло необходимость ускоренной их подготовки из неспециалистов и усилило давление на систему повышения квалификации. Что касается содержания постдипломного образования педагогов, то декларация видит главные направления в разрешении конкретных проблем профессиональной деятельности, помохи начинающим учителям, подтягивании опытного педагога к уровню современных требований в профессии, знакомстве с новыми достижениями теоретической педагогики, получении дополнительных квалификаций (например, освоение педагогом второго предмета преподавания).

Остановимся подробнее на национальных моделях организации системы постдипломного педагогического образования, учитывая, что их рассмотрение вне контекста базового педагогического образования и особенностей профессиональной деятельности педагога вряд ли имеет смысла. Базовое образование важно как обоснование одной из важнейших функций образования постдипломного — компенсаторной. Профессиональное положение педагога связано с реализацией другой важнейшей функции постдипломного образования — сопровождения педагогической деятельности. Иначе говоря, постдипломное педагогическое образование есть составляющая единой системы базовой подготовки педагога, возможностей и перспектив его карьерного продвижения, что во многом определяет ценность, потребности и мотивацию получения постдипломного образования.

Рассмотрим современное состояние этих страт анализа для ведущих западных стран.

В США ведущая форма получения базового педагогического образования — бакалавриат. Он существует в системе государственных (бесплатных) и частных (75 %) педагогических колледжей, работа которых сопровождается обязательными лицензированием и сертификацией. Велики полномочия штатов и самих колледжей в определении программ преподавания. Американские педагогические колледжи входят в структуру государственных и частных университетов и предоставляют три маршрута получения педагогического образования: 2+2, 3+1, 0+4 (количество лет обучения по академической программе университета и по педагогической специальности). Поступление в колледж происходит только по результатам тестов по окончании школы. Обучение в магистратуре (в последние годы наблюдается его рост) более свойственно опытным работающим учителям, которые ведут параллельно с преподаванием в школе исследовательскую деятельность. Большое значение в американском педагогическом образовании придается клинической и полевой моделям организации педагогической практики в лучших или обычных школах, возможен вариант годичной работы будущего педагога в школе в статусе младшего учителя при посещении постоянного семинара в колледже для осуществления анализа и корректировки возникающих проблем. При общей продолжительности педагогической практики от семестра до года учебы большинство американских экспертов сходятся в том, что такой срок недостаточен.

Содержание базового педагогического образования в США стандартизировано, курсы делятся на обязательные и факультативные по выбору студентов. Выбор осуществляется с помощью тьюторов и специальных университетских центров по разработке индивидуальных образовательных маршрутов. В содержание американского базового педагогического образования включены философия, социология и история образования, психология, общая характеристика действующей в США системы образования, ее программы и методики, педагогические этика и менеджмент. В рамках обширной самостоятельной работы студентов педагогических колледжей, сопровождаемой дистанционно через специальные сайты, большое внимание уделяется подготовке будущего



педагога к исследовательской и инновационной деятельности. В последнее время большое распространение в американской системе подготовки педагогов получает опыт организации поликультурного образования, когда по окончании учитель оказывается способен вести преподавание на английском и еще одном языке, распространенном среди основных диаспор американских мигрантов (китайский, испанский). Практикуется совместное обучение в группах из представителей разных этнических групп будущих учителей.

В США профессиональный статус учителя определяется в рамках процедуры лицензирования, которая осуществляется в специальных центрах, создаваемых общественными учительскими организациями штатов и федерального уровня и включает три последовательно сдаваемых экзамена, доказывающие общеобразовательные, предметные компетентности и позволяющие оценить уровень практической подготовки учителя. Последней экзамен сдается в ходе практической стажировки учителя в первый год работы. В последние годы среди американских педагогов увеличивается число демобилизованных из вооруженных сил. Для того чтобы претендовать на вакантное место школьного учителя, требуется диплом бакалавра и успешное прохождение последнего этапа лицензирования.

Вторым этапом достижения социально-профессионального статуса для американского педагога выступает добровольная сертификация, пройти процедуру которой чаще всего предлагается более опытным педагогам, чей профессиональный стаж превышает три года работы. В США становится все больше сторонников превращения профессиональной сертификации в обязательную процедуру. Сертифицируемые учителя представляют комиссии учителей-практиков портфолио, видеозаписи проведенных уроков.

Система постдипломного педагогического образования США не является централизованной. Роль координаторов этой деятельности выполняют специальные отделы в Департаментах образования штатов. Образовательные программы повышения квалификации педагогов разрабатываются в университетах и специализированными центрами, создаваемыми чаще

всего общественными учительскими организациями. Это определяет платный характер оказываемых американским школьным педагогам образовательных услуг. Особенностями распространенных в США вариантов организации постдипломного педагогического образования выступают его грантовый характер (как для организаций, осуществляющих образовательный процесс, так и для слушателей) и краткосрочность (не более трех недель) проводимых курсов.

Все большее значение для системы постдипломного педагогического образования в США имеют такие альтернативные привычным формы повышения квалификации, как создание исследовательских групп учителей для решения конкретной проблемы, партнерства школы и вуза, самомониторинг достижений учителя в виде портфолио (конспекты, разработки, видеозаписи уроков), дистанционные формы обмена педагогическим опытом [5, 11].

В структуру содержания американского варианта постдипломного педагогического образования включается: переподготовка лиц, не имеющих профессионально-педагогического образования; курсы для начинающих педагогов, для кандидатов на управленческие посты в системе образования; повышение квалификации уже работающих школьных учителей. Специфический акцент американской модели постдипломного образования педагогов связан с пристальным вниманием не к частным методическим аспектам, а к комплексному эффекту изменения всей среды школы в целом. Поэтому в процессе повышения квалификации американских учителей обучают прежде всего управленческим аспектам профессиональной деятельности (менеджмент и психология организации и управления; осознание своих профессиональных функций; психологический климат в коллективе; ролевое поведение в педагогических ситуациях; эмоциональное саморегулирование).

Характерной чертой базового педагогического образования в Германии является небольшое количество (6) самостоятельных педагогических вузов и интеграция подготовки педагогов в структуру университетов. Более позднее, чем в других странах, окончание немецкой гимназии (в 21 год), предопределяет начало профессиональной педагогической деятельности после завершения уни-



верситетского курса только в 27–28 лет. В германские университеты нет вступительных экзаменов, но проходит конкурс школьных аттестатов, по результатам которых делается вывод о готовности абитуриента к обучению в вузе. В результате после достаточно массового приема в вузы последующий отсев в вузе достигает ежегодно 60 %. В последнее время в Германии пристально изучают опыт ГДР, в котором при приеме абитуриента учитывался и его педагогический (волонтерский) опыт, и характеристика довузовской педагогической деятельности [1, 36].

Все немецкие вузы подвергаются жесткой аккредитации раз в 2–3 года, когда профессорско-преподавательский состав должен подтверждать свою квалификацию, когда рост его заработной платы зависит от результатов аккредитации, а не от стажа профессиональной деятельности.

Определяет состояние педагогического образования Германии и дифференциация обучения детей при получении основного и полного среднего образования (после получения начального образования) по разным видам школ — реальным училищам, современные средним школам, гимназиям, для работы в которых организуется специальная подготовка учителей.

Содержание немецкого педагогического образования включает дидактический, воспитательный, оценивающий, коррекционный, профориентационный, инновационно-технологический модули как отражение основных направлений профессиональной деятельности современного педагога. Большая широта и теоретичность преподаваемого материала связана с подготовкой магистров и будущих преподавателей гимназий, меньшая — с подготовкой бакалавров и будущих педагогов начальных школ.

Не меньшее значение имеет в педагогическом образовании Германии педагогическая практика, организуемая ежегодно в форме референдаума, то есть параллельной организации практической деятельности будущего педагога и ее сопровождения в ходе вузовской учебы. При университетах действуют тренировочные школы для организации таких практик. В дипломной работе обязательно отражение результатов практической деятельности студента. Кроме того, базовое немецкое педагогическое

образование характеризуется большим объемом самостоятельной работы студента, серьезным вниманием к воспитательной составляющей, понимаемой как подготовка к индивидуальному педагогическому сопровождению каждого ребенка [3, 161].

Получение вузовского диплома связано с необходимостью успешной сдачи квалификационных экзаменов по педагогике и предмету преподавания. Дипломная работа обязательно связана только с психолого-педагогической, а не предметной тематикой.

В Германии социальный статус учителей обусловлен прежде всего включением этой профессиональной группы в категорию государственной службы, что определяет их более высокую, чем в среднем по стране, зарплату и возможность в процессе профессиональной деятельности продвинуться по 16-уровневой сетке начав с 5–6 ранга и через 25–30 лет пребывания в профессии прийти к 14–16 ступени, соответствующей званиям учителя-методиста, завуча, школьного советника. Зарплата немецкого учителя складывается из базового компонента (стаж, квалификация, количество членов семьи, положение в указанной сетке) и доплат за дополнительные профессиональные функции — воспитательную деятельность, работу с родителями учащихся, тьюторство индивидуальных образовательных маршрутов. Также учителям выплачивается 13-я зарплата к отпуску. Возможно, это объясняет тот факт, что в немецкой школе 44 % педагогов — мужчины и среди получающих базовое педагогическое образование в вузах от 30 до 60 % студентов — мужчины. Хотя существующие условия профессиональной деятельности устраивают 70 % немецких учителей, однако половина опрашиваемых не выбрала бы педагогическую профессию вторично и выступает за досрочный выход учителей на пенсию. При этом обязательна аттестация немецких учителей раз в 6 лет [3, с. 153].

В Германии активно дискутируется вопрос о внешней, административной, или внутренней, осознаваемой самим педагогом, мотивации к повышению квалификации. Дело в том, что постдипломное педагогическое образование в Германии (его учреждения, курсы, отдельные семинары и мероприятия) оплачивается государством, при этом не превращаясь в обя-



зательную и централизованную систему, так как выбор формы и содержания повышения своей квалификации осуществляется сам педагог. Противники такой сложившейся системы апеллируют к невысокому (на уровне 10–12 % по стране на 2000 год) охвату педагогов различными формами постдипломного образования, говорят о введении обязательного и всеобщего повышения квалификации, ссылаясь на опыт некоторых земель и ГДР. Как уже было сказано выше, получение в Германии диплома о высшем педагогическом образовании не служит гарантией получения работы учителя, необходимо выдержать испытательный срок (референдиат) и доказать профессиональную состоятельность. При этом в Германии не существует обязательных государственных лицензирования и сертификации учителей, но есть проходимая педагогом раз в 6 лет аттестация (служебная оценка всех учителей, кроме лиц старше 55 лет, с характеристикой аттестуемого как воспитателя, предметника, методиста, коллегу, личности). Существование рынка учительских вакансий создает реальную возможность отбора лучших учительских кадров и сопровождается стимулированием эффективной преподавательской деятельности (повышение зарплаты раз в два года, возможность приглашения на работу в школу более высокого уровня, существование горизонтальной учительской карьеры в виде иерархии почетных званий учителя-методиста, завуча, школьного советника). Все указанные факторы влияют на материальную обеспеченность работающих учителей и заставляют их профессионально совершенствоваться, причем рекомендованным аттестационной комиссией средством такого совершенствования может выступать повышение квалификации. Окончательное решение, где и как педагог будет повышать свою квалификацию, остается за управляющим советом школы.

Структурами постдипломного педагогического образования в современной Германии выступают федеральные Педагогическая академия и Научно-педагогический институт, а также региональные университеты. В Германии нет централизованной государственной системы специальных учреждений дополнительного профессионального образования педагогов, но есть специальные центры повышения квалификации, организуемые учительскими профсоюзами. В структуре региональных органов управления

образованием есть два отдела — по разработке программ повышения квалификации педагогов и по организации набора слушателей. Также в Германии есть частные модераторские (управляющие) центры, которые координируют спрос и предложение в области повышения квалификации. Если педагог, управляющий совет школы принял решение о необходимости постдипломного образования и выбрали форму и учреждение по его осуществлению, то вся оплата этих образовательных услуг ложится на государство, вплоть до проезда педагога к месту учебы.

Содержание постдипломного образования педагогов в Германии подразделяется на овладение учителем дополнительными квалификациями (аналог переподготовки) и углубление имеющихся у педагога компетенций (Fortbildung und Weiterbildung). Возможны также заочное обучение с постоянными семинарами, прохождение курсов при вузах, участие педагога в опытно-экспериментальной работе и обучение в аспирантуре, его участие в научных конференциях и внутришкольных мероприятиях, обучение иностранным языкам и страноведению для обмена педагогическим опытом в ходе образовательного туризма, что приравнивается к повышению квалификации. Наличествует мощная обратная связь со слушателями через анкеты с выставлением оценок курсам и их преподавателям, что подразумевает постоянную корректировку их содержания и форм [2, с. 54].

Система базового педагогического образования Франции исторически включала в себя две модели. Первая была связана с университетской подготовкой преподавателей для французской полной средней школы — лицея, когда бакалавр какой-либо науки (школьного предмета) еще год обучался в университетском педагогическом центре. Вторая восходила к системе нормальных школ как аналога российских довоенных учительских семинарий, т. е. средних педагогических учебных заведений, где основной центр подготовки нормальянцев был связан с осваиваемой практически методикой начального образования (стоит помнить, что во Франции оно продолжается 5–7 лет).

Реформа 1982–1986 годов объединила обе модели, и теперь во Франции осуществляется единая подготовка учителей в университетских колледжах и региональных нормальных школах, включенных в структуру местных университетов

как университетские институты по подготовке учителей, преподаватели которых стали теперь университетскими профессорами. Каждый университетский педагогический институт сам формирует свою программу, утверждаемую министерством.

Работает формула 3+2, когда студент 3 года проходит обучение наукам, связанным с предметом преподавания, и 2 года — по педагогическим дисциплинам. Иными словами, действует принцип: чем старше курс, тем больше педагогической, а не предметной подготовки.

Характеристиками базового педагогического образования во Франции выступают индивидуальные образовательные маршруты для студентов, включающие большое число часов самостоятельной работы, результаты контроля над которой отражаются в личном деле. Имеет место большое число разнообразных видов педагогических практик в форме стажировок студента в школе (пассивная — наблюдательная; сопровождающая; самостоятельная, когда студент заменяет работающего учителя), во время прохождения которых практиканты получают зарплату за выполнение необходимых школе педагогических функций. При этом к практикантам прикрепляется представитель школы — педагогический советник.

По содержанию французское педагогическое образование включает подробную характеристику национальной системы образования, педологический модуль разнообразных сведений о ребенке, требования к преподавателю и его профессиональной деятельности, модуль педагогических технологий, сведения о социально-партнерском окружении школы, модуль воспитательной работы. Наиболее распространенными формами являются групповое и индивидуализированное обучение, а также работа тренинг-групп для разбора возникающих в практике педагогической деятельности проблемных ситуаций. Практикуется микропреподавание, когда в рамках тренировочного урока и его фрагментов отрабатываются отдельные педагогические навыки.

Дипломная работа, обязательно выполняемая по педагогике, защищается перед жюри с обязательным анализом практической деятельности студента и разбором имевшихся в ней ситуаций, а также с привлечением сведений из личного дела студента.

Профессиональный статус педагога во Франции определяется комплексом требований к соискателям учительских вакансий: французское гражданство; университетское образование; пригодность по состоянию здоровья; успешная сдача конкурсных экзаменов (отборочных и приемных) на должность учителя по преподаваемым предметам и педагогическим дисциплинам; обязательное знание одного языка мигрантов, количество которых во французских школах постоянно возрастает.

Система постдипломного образования Франции связана с повышением квалификации действующим учителем во время периодически предоставляемого ему обязательного отпуска, который используется для повышения профессионального уровня. Во Франции государство оплачивает предоставляемый раз в пять лет каждому работающему учителю 36-недельный отпуск для повышения его квалификации. Естественный для российской школьной действительности вопрос «А кто будет в это время работать?» решается во Франции замещением ушедшего в отпуск учителя проходящим испытательный срок стажером, получившим базовое педагогическое образование и доказывающим теперь, что может расчитывать на имеющиеся учительские вакансии. Такая система организации постдипломного образования учителей сложилась только с 70-х годов XX века. Повышение квалификации, которое организуют 28 окружных координирующих органов — академические миссии, имеет добровольный, но достаточно востребованный характер и осуществляется в трех вариантах: с отрывом от преподавания на 6–12 недель, краткосрочно без прекращения преподавания и в виде так называемых «летних университетов», аналога российских летних курсов [10, сю 15].

Характерным примером развития системы может выступать педагогическое образование в Великобритании. В XX веке система педагогического образования этой страны пережила два этапа в своем развитии: этап стабильности (1900–1970), когда сложившаяся в XIX веке система продолжала существовать с некоторыми модификациями, и этап реформирования (1970–2000), когда система педагогического образования подверглась существенной перестройке.

На первом этапе учительские колледжи существовали фактически независимо от университе-



тов, в которых сложилась устойчивая система подготовки педагогов для средней школы на педагогических отделениях. После трех-четырехлетнего обучения в университете по основной специализации бакалавр проходил однолетнее обучение на педагогическом отделении и получал свидетельство о постдипломном (!), но уже педагогическом образовании, дававшее ему право работать преподавателем, как правило, двух смежных школьных предметов. Такая система окончательно сложилась к 50-м годам XX века. Не случайно в Англии установлено различие между понятиями «обучить» (преподать практический) и «образовывать» (дать интеллектуальную, моральную или социальную инструкцию). Таким образом, педагогическое образование относилось именно к сфере практических навыков, менее статусных, чем университетское образование.

После 1970 года в Англии небольшие по числу студентов уличельские колледжи стали укрупняться, интегрируя их в структуру университетов. К 1973 году в стране насчитывалось 206 педагогических учебных заведений, из которых 152 уличельских колледжа (84 тыс. студентов), 30 университетских педагогических отделений (7,5 тыс. студентов), 11 инженерно-педагогических колледжей по подготовке преподавателей для системы профессионально-технического образования и 13 центров подготовки преподавателей из области искусств (2 тыс. студентов). Очевидно, что именно уличельские колледжи были самой массовой структурой системы английского педагогического образования. Кроме государственных, в стране работало 50–60 частных педагогических колледжей, получавших государственное финансирование в зависимости от количества обучавшихся в них студентов, среди которых было много конфессиональных. Педагогические колледжи, как и педагогические отделения университетов, не имели единого учебного плана, но в последних начался постепенный переход к подготовке будущих преподавателей только по одному, а не по двум как ранее предметам [4, с. 336–338].

Очередным рубежом в развитии английского педагогического образования стал 1980 год. Общественная дискуссия о качестве подготовки педагогов была инициирована директором Института образования Лондонского университета Уильямом Тейлором, призвавшим создать жесткую государственную централизованную

систему оценки качества педагогического образования, сосредоточенную в специальном Комитете по аккредитации образования учителей (САТЕ), который теперь должен был контролировать и регламентировать все имеющиеся в стране варианты подготовки педагогов. Такая модель была непривычна для традиций английского либерализма, свободной конкуренции различных образовательных учреждений и принципа университетской автономии. Инициативы Тейлора получили как поддержку со стороны тори, так и серьезную оппозицию университетского лобби, увидевшего в ней наступление на свои права.

С 1988 года Англия провела «некоторую быструю реформу, где реформа педагогического образования была частью более масштабной реформы образования» [4, с. 339].

Главный организационный аспект реформы 1998 года состоял в переносе центра тяжести подготовки учителей с педагогических отделений университетов на практическую стажировку в школе, что делало саму эту реформу достаточно радикальной. Проводником этой воплощенной, несмотря на сопротивление уличельской оппозиции, в жизнь и привившейся за 90-е годы реформы стал министр образования Кенет Кларк. Суть реформы сводилась к созданию при министерстве Национального агентства по обучению учителей, сосредоточению содержания педагогического образования на блоке практики (2/3 учебных часов), жесткому государственному инспектированию учреждений педагогического образования и государственному финансированию только при положительных результатах проверок. Главным звеном стало появление школьных консорциумов, когда группа школ добровольно разрабатывала и проходила аккредитацию образовательной программы подготовки педагогов, получала государственное финансирование и, часто в сотрудничестве с университетами, осуществляла такой вариант педагогического образования. Кроме того, элементами реформы стали заочное получение педагогического образования в Открытом университете (1994), создание независимого агентства по формированию рынка труда начинающих педагогов и предоставление кредитов на получение педагогического образования. Несмотря на то, что инициатива реформы исходила от консервато-



ров, лейбористское правительство Т. Блэра сохранило нововведения как полезные.

В последнее десятилетие университеты по-прежнему предоставляют педагогическое образование, либо дополняя базовую академическую подготовку университета однолетним педагогическим курсом и дальнейшей практикой (3/4 студентов — будущих педагогов), либо давая диплом бакалавра образования с последующей практической стажировкой. Система учительских колледжей постепенно сокращается, так как магистральным направлением предполагает педагогическое образование как высшее. Поэтому все чаще учительские колледжи интегрируются в систему университетов, получая право предоставлять высшее образование [4, с. 347].

Постдипломное педагогическое образование в Великобритании государством не финансируется, несмотря на попытки в 70-е годы пересмотреть такое положение. Стажировка у более опытного педагога-консультанта, учеба на курсах повышения квалификации при местных органах управления образованием или университетах оплачивается либо самим педагогом, либо школой, в которой он работает. Общей тенденцией становятся своеобразные тендерные заказы на повышение квалификации учителей и их передача школам (аналог российских школ — ресурсных центров) как вспомогательная функция школьного образования. Стимулирует процессы повышения квалификации педагогов в практической деятельности повышенный статус «квалифицированного учителя», дающий материальные и карьерные преимущества по сравнению с обычным дипломом университета о педагогическом образовании.

Система постдипломного педагогического образования Великобритании основывается на том, что бакалавр университета — будущий предметник, начав работать в школе в качестве испытуемого стажера, в течение года доучивается практически в школьном консорциуме, представляющем объединение нескольких местных школ, за что государство перечисляет педагогам этих школ отдельное финансирование. Повышение квалификации уже работающих педагогов осуществляется в Великобритании на оплачиваемых из средств школы краткосрочных курсах, проводимых в специальных учительских центрах при университетах [7, с. 60–65].

Сравнительный анализ базового педагогического образования выявил пять основных тенденций, которые оказывают влияние на организацию постдипломного педагогического образования в этих странах и могут служить ориентирами для реформирования базового педагогического образования в России:

сосредоточение педагогического образования в университетах, куда интегрированы специальные педагогические учебные заведения, исторически существовавшие отдельно и предназначавшиеся ранее для подготовки педагогов начальной школы. Курс на получение всеми школьными педагогами высшего педагогического образования, медленный рост числа специальных педагогических вузов;

усиление внимания к организации самостоятельной учебной работы студентов и ее сопровождению, акцент на освоении компонентов психолого-педагогического блока по сравнению с предметным, который ранее доминировал;

модульный принцип организации содержания базового педагогического образования, оптимальный для индивидуальных образовательных маршрутов, охватывающий основные сферы знаний и компетенций будущей профессиональной деятельности, включаемые в программу вузовской подготовки учреждением самостоятельно, а не по единому федеральному стандарту и не в виде меняющегося произвольно набора педагогических дисциплин;

разнообразие форм и приемов организации обширной педагогической практики студентов, не имитация, а реальное включение в посильную для студента работу в школе, которая находит обязательное отражение в выпускных квалификационных работах студентов;

разведение вариантов профессионально-педагогической подготовки по линиям бакалавриата и магистратуры в зависимости от видов школ, в которых планируется преподавать; неокончательный характер вузовской подготовки педагога; необходимость дальнейших доказательств своей профессиональной квалификации, определяемых социальным и профессиональным статусом педагогической профессии.

Еще две страны — Китай и Финляндия — представляют две разнонаправленные модели организации постдипломного образования педагогов. Наиболее централизованный китайский вариант определяется массовостью учи-



тельского сообщества (16 млн учителей). Институты усовершенствования учителей и повышения квалификации специалистов в Китае организованы при университетах. Образовательный процесс в них строится по утвержденным централизованно для всей страны министерским программам переподготовки и повышения квалификации педагогов; имеется 808 таких программ. Финансирование постдипломного педагогического образования в современном Китае на  $\frac{3}{4}$  осуществляется государством, в остальной части — на средства самих школ. Кроме того, практикуется ежегодный отбор примерно 1 млн педагогов-лидеров и их посменная переподготовка, выделение 5-летних грантов для 100 наиболее выдающихся молодых педагогов страны [6, с. 221].

Противоположный вариант организации постдипломного педагогического образования дает Финляндия. Разнообразие типов и видов финских образовательных учреждений определяет в этой стране разнообразие педагогических функций работников этой системы, что, в свою очередь, ведет и к разнообразию маршрутов постдипломного образования. Другим фактором формирования именно такой системы является высокая зарплата учителей с базовым педагогическим образованием (коэффициент 4 за высшее педагогическое и 1, например, за высшее техническое образование педагога), модульная система осуществляемого университетами базового педагогического образования по четырем направлениям — воспитатели ДОУ (бакалавры), классные воспитатели, педагоги-предметники, коррекционные педагоги (магистры). Приоритет в содержании финского базового образования отдается педагогической теории и практике, а не предметным знаниям. Действующие при 8 из 20 финских университетов департаменты дополнительного образования и профессионального развития включают по 100–150 сотрудников каждый, что показывает, какое значение придается постдипломному образованию в этой небольшой стране.

Повышение квалификации выступает частным делом заинтересованного в профессиональном росте педагога и его работодателя (попечительский совет школы, муниципалитет, государственные органы). Кстати, повышение профессиональной квалификации не рассматривается как основание для увеличения учительской

зарплаты, но это не касается профессиональной переподготовки, когда, к примеру, классный воспитатель переходит на уровень преподавателя предмета. Это дело творческих амбиций самого педагога и понимания школой необходимого решения ряда собственных проблем.

Повышение педагогической квалификации производится при вузах, является важнейшей функцией упомянутых выше университетских департаментов, может сопровождаться частыми переездами слушателей в зависимости от изучаемой педагогической проблемы (своеобразный аналог отечественной накопительной системы, помноженный на небольшую территорию страны и легкость таких переездов) или осуществляется дистанционно. Финская система повышения квалификации педагогов до 1970-х годов была государственной и бесплатной. Теперь она реформирована, и либо сам педагог, либо работодатель с возможной финансовой поддержкой государства или муниципальных органов оплачивает ее.

Университетские структуры повышения квалификации педагогов проводят мониторинг таких курсов, констатируя, что самые эффективные из них — долгосрочные (до 3 лет, но проводимые сессионно) проектные проблемные курсы в малых группах для учителей одного региона страны (губернии), с гибкой программой, создаваемой в процессе организованной рефлексии профессиональных проблем самими педагогами. Теоретический модуль таких курсов краток, основную часть их занимает групповая проектная деятельность. Кроме того, возможен и дистанционный вариант профессионального развития учителей, когда вузы предлагают им методику преподавания предметов, а педагоги экспериментально апробируют ее, присыпая в университетские центры отзывы о результатах. При этом финских педагогов в большей степени интересуют проблемы сохранения своей квалификации на уровне новых научных достижений по преподаваемому предмету (70 % повышающих квалификацию), чем новые методики его преподавания (30 %).

Таким образом, государство в Финляндии берет на себя не целевое финансирование всей системы повышения квалификации педагогов, а только национально значимые проекты, например развитие физико-математического школьного образования, когда из 34 млн евро затраченных

средств 10 млн ушло на повышение квалификации педагогов [9, с. 37–41].

Попытаемся сформулировать выводы о факторах, влияющих на модернизацию современных систем постдипломного образования педагогов.

Во-первых, послевузовское образование педагогов во всех проанализированных странах опосредовано содержанием и формами базового педагогического образования и может представлять различные варианты их соотношения, когда постдипломное образование в большей степени реализует какую-либо одну свою функцию, которую базовая подготовка педагогов реализует в меньшей степени: например, дополнение базовой подготовки по предмету педагогическими компетенциями; приобретение педагогами дополнительных компетенций; воспроизведение быстро устаревающих педагогико-теоретических знаний; сопровождение профессионального развития работающих педагогов.

Во-вторых, развитие системы постдипломного образования опосредовано социальным статусом и востребованностью учительской профессии, государственным осознанием значимости повышения квалификации педагогов, ролью материального стимулирования педагогического труда, дифференцированного в зависимости от качества работы, возможностью карьерного роста учителя, престижем профессии учителя в обществе, осознанием самим учителем своей социальной миссии.

В-третьих, зарубежный опыт показывает сохранение определенного паритета преимуществ и недостатков между централизовано-унитарными (Россия, КНР, Италия, Чехия), демократически-многообразными (США, Англия, Япония, Польша, Канада, Германия, Франция) моделями организации постдипломного образования и их многочисленными промежуточными вариациями. Причем данный дуализм распространяется не только на структуры системы постдипломного образования, но и на выбор приоритетов в содержании и формах повышения квалификации учителей. Проектирование возможных моделей такой системы связано:

с возможностями формального, неформального и информального постдипломного образования в его вертикальных и горизонтальных сетевых вариантах;

с разработкой унифицированных или индивидуализированных образовательных программ вузовскими структурами, органами управления образованием, профессиональными учительскими организациями;

с обязательностью или добровольностью повышения квалификации в их связи с аттестацией и сертификацией работающих педагогов;

с оптимальностью частых и коротких или редких и долгосрочных курсов.

Актуализация в системе постдипломного образования последних двух десятилетий именно потребностей учителей в сопровождении их профессиональной деятельности (инноватика, исследования и эксперименты; знания по предмету; решение ситуативных проблем; групповая/командная работа; учительское лидерство и др.), востребует именно неформальные и информальные формы постдипломного образования.

В-четвертых, факторами развития системы постдипломного образования выступают его национальные традиции (например, университетский или специально-профессиональный варианты базового педагогического образования; отношения общества и государства к педагогической деятельности на уровне исторической ментальности; сложившаяся прежде система и готовность к ее осознанному преобразованию).

Наконец, в-пятых, исторически сложившаяся в России система постдипломного образования имеет принципиальные отличия от обобщенной зарубежной модели, а именно:

<i>Российская система ПК</i>	<i>Западная система ПК</i>
Государственная (аттестация).	Общественная (профессиональные ассоциации).
Унифицированная (форма важнее содержания).	Разнообразная (содержание и потребность важнее формы).
Обязательная	Добровольная (сам учитель или его школа)
Централизованная, вертикальная (зачетно-экзаменационная система)	Горизонтальная (обмен опытом, стажировки)
Бесплатная фактически (государство оплачивает)	Платная (учитель, его школа, государство участвует частично)



Именно размышление над возможностью внедрения в отечественную образовательную практику характерных черт западных моделей

и составляет основу реформирования российской системы постдипломного педагогического образования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Блинов, В.М.** История становления и развития профессионально-педагогической подготовки учителей в Германии [Текст] / В.М. Блинов.— Владимир, 2001.
2. **Болотова, А.К.** Организация высшего педагогического образования в Германии [Текст] / А.К. Болотова, О.В. Кузема // Преподаватель.— 2001, № 5.— С. 53–56.
3. **Глухова, Т.В.** Учительство в Германии как социально-профессиональная группа [Текст] / Т.В. Глухова/ Под ред. В.С. Собкина.— Социология образования.— Т. 9, вып. 15.— М., 2004.
4. **Иванова, Ю.В.** Развитие педагогического образования в Англии в XX веке [Текст] / Ю.В. Иванова // Миссия учителя в прошлом, настоящем, будущем: Монография / Под ред. А.В. Уткина.— Нижний Тагил, 2010.— Гл. 25.— С. 335–347.
5. **Кузьминых, Ж.О.** Профессиональная подготовка будущих учителей в школах профессионального развития США [Текст]: Автореферат дисс. ... канд.
- пед. наук / Ж.О. Кузьминых.— Йошкар-Ола, 2007.
6. Модернизация педагогического образования в зарубежных странах на современном этапе [Текст]: Монография / Под ред. Б.Л. Вульфсона, В.А. Мясникова, А.К. Савиной.— М., 2009.
7. **Никитин, Э.М.** Развитие отечественной и зарубежной системы повышения квалификации педагогов [Текст]: Учебное пособие / Э.М. Никитин, А.П. Ситник, И.Э. Савенкова, И.В. Крупина.— М., 2005.— С. 58–73.
8. **Певзнер, М.Н.** Педагогическая профессия в XXI веке [Текст] / М.Н. Певзнер, А.Г. Ширин.— Новгород, 2009.
9. **Шевелев, А.Н.** Система образования и повышение квалификации педагогов Финляндии [Текст] / А.Н. Шевелев // Методист.— 2005. № 6.— С. 37–41.
10. **Шлейфер, И.В.** Подготовка учителей начальных школ в современной Франции [Текст]: Автореферат дисс. ... канд. пед. наук / И.В. Шлейфер.— М., 1990.

УДК 001:929

А.И. Демидов

### К ИСТОРИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В РОССИИ: ВИЛЛИМ ИВАНОВИЧ ГЕННИН (1676–1750)

Виллим Иванович Геннин (Георг Вильгельм де Геннин) — инженер и артиллерист, один из организаторов горнometаллургической промышленности в России первой половины XVIII в., родился 11 (21) октября 1676 года в Нассаяу-Зиген в Германии [1]. В 1698 году был принят Петром I на службу фейерверкером. По прибытии в Москву обучал молодых дворян артиллерию. В 1700 году он был произведен в поручики, в 1702-м — в капитаны, в 1706-м — в майоры. В 1710 году Геннин в качестве артиллериста и инженера-фортификатора участвовал во взятии Выборга и Кексгольма (Приозерска). За взятие Кексгольма Геннин получил от Петра I золотую медаль с алмазами, деревню в Кексгольмском уезде с 60 дворами и звание подполковника.

В 1712 году Государь поручил Геннину достроить Литейный двор и перестроить пороховые заводы на Санкт-Петербургской стороне Санкт-Петербурга. Вероятно, это поручение В.И. Геннин выполнил с большим успехом, ибо в конце 1713 года был назначен Олонецким (Карелия) комендантом и начальником Петровского, Повенецкого и Кончевозерского заводов. Восстанавливая старые заводы, он привел их в такое состояние, что они могли снабжать новый российский флот пушками, якорями, ружьями и снарядами. Пушки, отливаемые на Петровском заводе, по качеству стали были не хуже шведских. При испытаниях из 1000 пушек лопнуло только три. Геннин строил на Олонецкой верфи речные суда, готовил для флота корабель-



ный чугунный балласт и для Адмиралтейства смолу. В начале 1716 года государь был на Олонецких заводах и на верфи, остался доволен трудаами Геннина и произвел его в полковники.

Умный, трудолюбивый и деятельный, Геннин учредил в Олонце школу. В письме к графу Апраксину от апреля 1716 года Геннин сообщал: «с Москвы 12 школьников по письму Вашего Сиятельства на завод прибыли из нижних чинов, и определил их во обучение: к доменному, пушечному, якорному, эфесному и прочим заводским делам. А те школьники, которых Ваше Сиятельство изволил мне вручить 20 человек, из бедных дворянских детей в С.-Петербурге, я отвез на заводы; и ныне им школа у меня там заведена изрядная; учат Арифметику, Геометрию, Рисование, Артиллерию и Инженерное дело».

В 1716 году им были открыты минеральные воды в Олонецком уезде. Государь и генерал-адмирал Апраксин в январе—марте 1719 года посетили минеральные воды, и государь наградил Геннина своим портретом с алмазами.

В апреле 1719 года Геннин выехал из России за границу. Он побывал в Голландии, Саксонии, Пруссии, где осматривал заводы и фабрики, проводил вербовку специалистов. Геннин установил хорошие отношения с прусским королем, и тот пожаловал ему орден de la Générosité. В июне 1720 года Геннин вернулся в Петрозаводск (Олонец) и приступил к строительству



Виллим Иванович Геннин

плотины для обеспечения водою новых мануфактур. Построил установки: для изготовления жести, сверления ружейных стволов, точения стволов, получения стали, сварки якорей.

В июле 1721 года Геннин получил указ из Коллегии Адмиралтейства, которым повелевалось ему строить недалеко от Санкт-Петербурга, на реке Сестре, плотину и оружейный завод. Хотя Геннин и занимался строительством Сестрорецкого оружейного завода, он в то же время продолжал исполнять обязанности олонецкого коменданта и начальника Олонецких заводов.

В феврале 1722 года Петр I изволил опять быть у марсиальных вод и на Олонецких заводах. Надо полагать, что государь был весьма доволен умными действиями трудолюбивого Геннина и 5 марта 1722 года произвел его в генерал-майоры от Артиллерии.

В марте 1722 года государь приказал Геннину немедленно ехать в Сибирь и разобрать там причины несогласий между капитаном Татищевым и Никитою Демидовым, а впоследствии дал Геннину еще ряд поручений. Так 29 апреля того же года прислал подробную инструкцию. В ней предписывалось:

«I. Ехать ему в Кунгурской, Верхотурской и Тобольской уездах, где есть наши железные и медные заводы.

И железные заводы во всем исправить, а именно пушечным литьем.

Также велеть там делать уклад, сталь, жесть и дощатое кровельное железо. И сделать для резания железа и для проволочного дела машины.

А которые похотят тому делу от партикулярных заводов ( заводы, принадлежащие частным лицам — *авт.*) учиться — и таких учить.

II. Медные заводы также во всем исправить и привести в доброе состояние и размножение.

Розыскать между Демидовым и Татищевым, также и о всем деле Татищева, не маня ни для кого, и писать о том в Сенат, также в Берг-коллегию и к нам.

IV. Что надобно будет к обоим заводам (Уктурскому и Каменскому), каких деревень и земель, о том писать в Сенат, откуда велели Мы ко удовольствию тех заводов чинить немедленно резолюцию.

V. На первое время для строения и работ на те заводы людей и прочее, что к тому делу принадлежит, требовать от губернаторов и от воевод, о чём к ним даны вам послушные указы.

VI. На дачу жалованья мастеровым людям, которых велено тебе с собою взять, отпускается с вами



денег на два года 2862 руб. 48 коп; да сверх того на чрезвычайные расходы тысяча рублей».

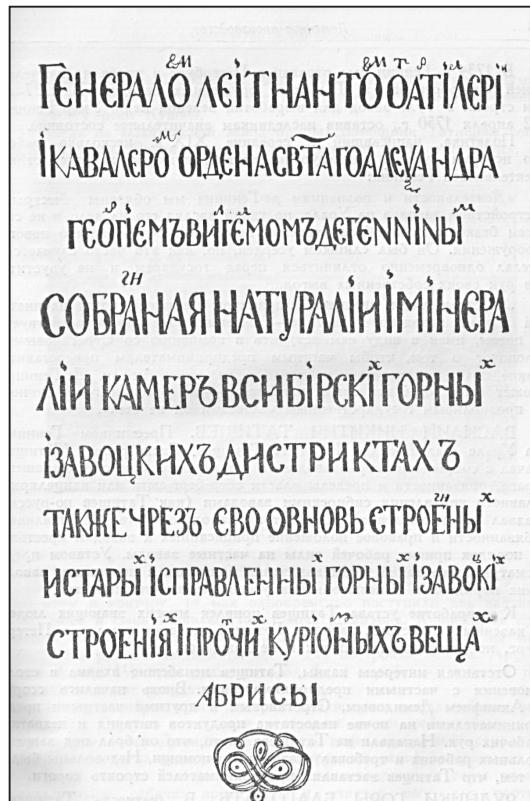
1722 года  
Апреля в 29 день Петр  
В Преображенском»

Отправляясь на Урал, Геннин забирает с собой ряд иностранных специалистов, а также русских мастеров, подмастерьев и учеников с Олонецких заводов и из Петербурга.

Геннин уехал на Урал не только строить заводы, Петр I поручил ему построить и крепость для охраны заводов. В письме Екатерине I от 1 июля 1723 года Геннин писал, что строящиеся на берегах реки Исеть крепость и завод он до Указу осмелился именовать Екатеринбургом, «в память Высокославного имени Вашего Величества...».

Во время своей работы на Урале Геннин несколько раз приезжал в Санкт-Петербург для представления отчета и для лечения. В центре его награждают и вновь посылают на Урал «для содержания в добром порядке» медных и железных заводов. В 1727 году за усердную службу император Петр II произвел Геннина в генерал-лейтенанты, а в 1731-м императрица Анна Иоанновна пожаловала Геннину знаки ордена Святого Александра Невского. После получения ордена Св. Александра Невского Геннин начал подписываться «де-Геннин».

Интересно отметить, что 22 мая 1730 года был издан сенатский указ, в котором поручалось: «Генерал-лейтенанту Геннину сочинить вместе с Берг-коллегией ведомости о состоянии заводов, количестве металлов и числе заводских людей». Геннин принял указ к исполнению. В 1730–1735 годах он написал обширный труд, посвященный описанию уральских и сибирских заводов, который в подлиннике назывался так: «Генералом-лейтенантом от артиллерии и кавалером ордена святого Александра Георгием Вильгельмом де-Генниным собранные натуралии и минералии камер в сибирских горных и заводских дистриктах также чрез ево о вновь строенных и старых исправленных горных и заводских строениях и прочих куриозных вещах абрисы» [2]. Этот труд был своего рода энциклопедией, содержащей различные сведения о русской металлургической промышленности того времени — о сырье, технологии его переработки и конечном продукте, о внутреннем устройстве заводов, организации производства и т. д. Рукопись Геннина в течение 200 лет после ее на-



Факсимиле титульного листа  
к сочинению Г. В. де Геннина

писания оставалась неопубликованной (лишь в 1828 году в «Горном журнале», № 7–12, были опубликованы отрывки из нее). Впервые полностью рукопись была издана в 1937 году под редакцией академика М.А. Павлова.

В 1734 году Геннина по его просьбе переводят в столицу и заменяют Татищевым. Последнему предписываются принять у Геннина все заводы, казну, дела, чертежи и проекты, для пользы тех заводов сочиненные, а Геннину и ассессору Рудаковому, взяв с собой правильные счета, ехать в Петербург [3].

Последние пятнадцать лет своей жизни Геннин был начальником Сестрорецких заводов (1735), управляющим Главной артиллерийской канцелярии, членом Военной коллегии (1735–1737), начальником Тульского оружейного завода (1737–1741), служащим артиллерийской оружейной канцелярии Военной коллегии (с 1741 года) [4].

Умер Виллим Иванович Геннин 12 (23) апреля 1750 года в Санкт-Петербурге.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Берх, В.** Жизнеописание генерала-лейтенанта Виллима Ивановича Геннина, основателя российских горных заводов [Текст] / В. Берх // Горный журнал.— 1826. Кн. 1.— С. 51—129; Кн. 2.— С. 113—172; Кн. 3.— С. 89—143; Кн. 5. С.87—149. Дополнение к жизнеописанию генерал-лейтенанта Виллима Ивановича Геннина // Горный журнал.— 1826. Кн. 9.— С. 85—108.
2. **Де Генин, В.** Описание Уральских и Сибирских заводов 1735 [Текст] / В. де-Геннин / Предисл. акад. М.А. Павлова. — М.: Гос. изд-во «История заводов», 1937.— 662 с.
3. **Злотников, М.Ф.** Первое описание Уральских и Сибирских заводов [Текст] / М.Ф. Злотников // В кн.: Описание Уральских и Сибирских заводов 1735 / В. де-Геннин; предисл. акад. М.А. Павлова. — М.: Гос. изд-во «Истории заводов», 1937.— С. 11—64.
4. Металлургия Урала: Энциклопедия [Текст] / Гл. ред. А.А. Козицын, Л.И. Леонтьев. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2001.— 448 с.

УДК 378.14

*Ю.П. Похолков, С.В. Рожкова, К.К. Толкачева*

## СОВРЕМЕННОЕ ИНЖЕНЕРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ КАК ОСНОВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ РОССИИ

В существующих условиях глобальной конкуренции, сложившихся на мировом рынке, одна из приоритетных задач развития современного государства — постоянная технологическая модернизация. Во многих развитых и развивающихся странах мира уже активно идет процесс качественного обновления технологической базы, разрабатываются и внедряются инновационные технологии, способные обеспечить конкурентные преимущества.

Для России вопрос технологической модернизации стоит особенно остро. Практически все, чем мы сегодня пользуемся, сделано не в России: автомобили, мотоциклы, компьютеры, множительная техника, средства связи, теперь уже самолеты и пароходы. Абсолютное большинство такого рода продукции, включая и высокие технологии — зарубежное. Анализ статистических данных структуры российского экспорта не позволяет говорить о достижении необходимого уровня инновационной активности. В СССР в 1960-е и 1970-е годы доля машин и оборудования в общем объеме экспортимой продукции составляла соответственно 20,5 и 21,5 %. Однако уже в 1985 году эта доля упала до 13,9 %. Сейчас она колеблется около 5 % и держится на этом низком уровне последние 5 лет. Для сравнения: в 2009 году доля экспорта машин и обо-

рудования Республики Корея составила 56 %, США — 34,7 %, Германии — 34,7 %, Японии (2008 год) — 62 %. Плюс к этому в США и Германии экспорт промышленных товаров и готовых изделий был на уровне соответственно 18,2 и 21,6 %. В настоящее время доля промышленных предприятий в России, осуществляющих разработку и внедрение технологических инноваций, не превышает 10 %. Доля российской инновационной продукции в общем объеме продукции промышленного производства составляет всего 5,5 %. При этом доля российской высокотехнологичной продукции в мире составляет всего 0,2 %. О крайне высокой зависимости России от импорта потребительских товаров, технологий и сложной продукции говорится и в статье В.В. Путина «Нам нужна новая экономика» [1]. Для достижения положительных изменений в данном направлении в первую очередь необходимо понять и проанализировать причины сложившейся ситуации.

Анализ состояния инженерного дела и инженерного образования России стал главной темой исследования, проводимого Ассоциацией инженерного образования России (АИОР) [2]. На сегодняшний день в рамках исследования было проведено 9 экспертизных семинаров с участием признанных в научно-образовательном



сообществе профессионалов России и Европы в области инженерного образования. Среди них известные эксперты академического сообщества — ректоры, проректоры, деканы и заведующие кафедрами российских и европейских инженерных вузов, руководители региональных отделений АИОР, а также представители промышленности. Всего более 200 человек. По результатам исследования более половины экспертов оценивают состояние инженерного дела как критическое (28 %) или находящееся в глубоком системном кризисе (30 %). По мнению 27 % экспертов, инженерное дело в нашей стране находится в состоянии стагнации и только 15 % признали его удовлетворительным (рис.1).

Среди основных признаков критического состояния инженерного дела в России были названы следующие:

низкая конкурентоспособность российского инженерного продукта и продукции целых отраслей промышленности на мировом рынке;

малая доля высокотехнологичной продукции в структуре экспорта РФ;

нехватка собственных разработок в области техники и технологий;

резкое падение престижа инженера;

закрытие предприятий, закрытие КБ и НИИ.

Для выхода из критического состояния требуется принятие адекватных и своевременных мер системного характера, а также политических, экономических и организационных решений

в стране в целом. В соответствии с указом бывшего президента РФ Д.А. Медведева были определены приоритетные направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, создана Комиссия по модернизации и технологическому развитию экономики России [3]. В настоящее время представителями разных уровней власти разрабатываются инструменты и предложения, призванные обеспечить эффективность проведения технологической модернизации. В 2010 и 2011 годах на базе Госдумы РФ и Совета Федерации РФ были организованы парламентские слушания по проблемам технологической модернизации России. Одним из итогов слушаний стал вывод о неосуществимости технологической модернизации России без развития и совершенствования инженерного образования [4]. Аналогичный вывод был получен и АИОР в ходе проведения исследования. Отвечая на вопрос о связи положений в инженерном деле и в инженерном образовании, 51 % экспертов признают устойчивую корреляцию между этими состояниями, 35 % отмечают слабую взаимосвязь, а 14 % считают, что состояние инженерного дела полностью определяется состоянием в инженерном образовании (рис. 2).

Анализируя состояние инженерного образования, эксперты пришли к выводу, что ситуация здесь не намного лучше, чем в инженерном деле. Пользуясь той же шкалой оценок, 17 % экспертов признали, что инженерное образование в Рос-

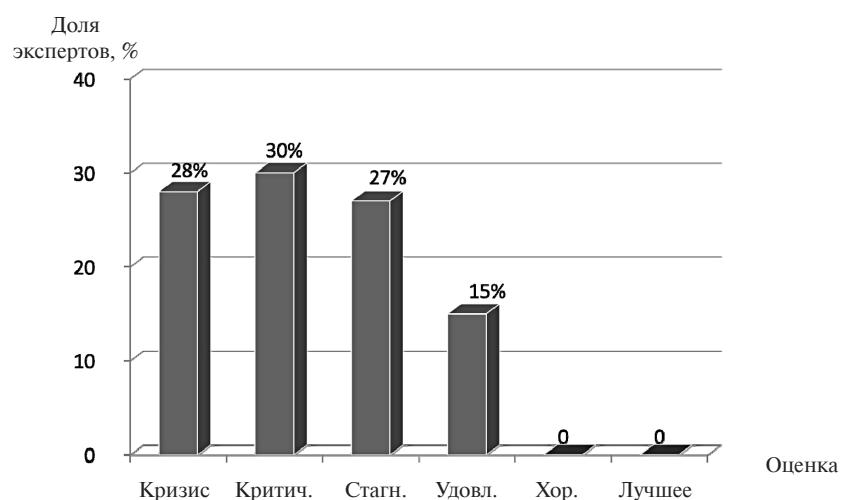


Рис. 1. Оценка состояния инженерного дела в России  
экспертами АИОР

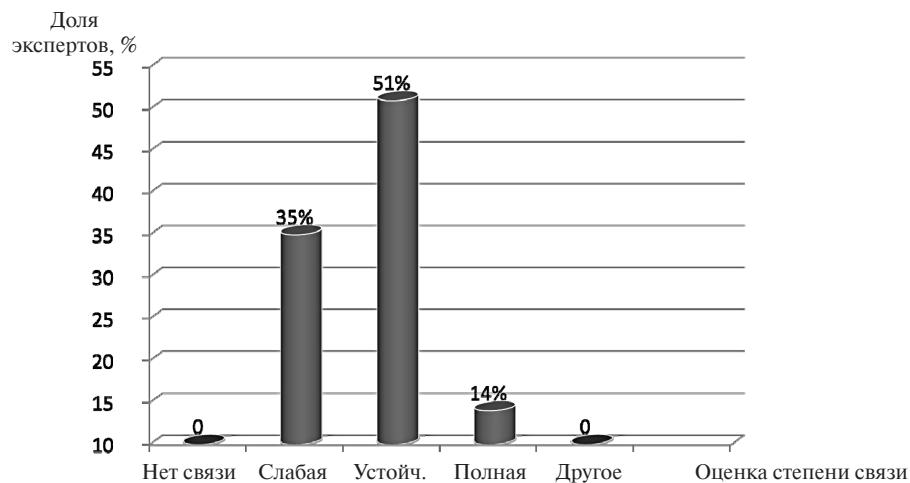


Рис. 2. Степень связи инженерного дела в России с состоянием инженерного образования

ции сегодня находится в состоянии системного кризиса, 36 % — в критическом состоянии и 30 % считают, что в инженерном образовании наблюдается стагнация. О том, что оно в удовлетворительном состоянии, думают 17 % экспертов. То есть подавляющее большинство экспертов (83 %) вынуждены признать, что инженерное образование в нашей стране находится в неудовлетворительном состоянии (рис. 3).

Мнение о необходимости развития и совершенствования инженерного образования России также разделяет и В.В. Путин, полагая, что «восстановление инновационного характера нашей экономики надо начинать с университетов — и как центров фундаментальной науки, и как кадровой основы инновационного раз-

вития». Единство мнений и осознание всей значимости проблемы позволяют делать оптимистичные прогнозы о реализации планов по технологической модернизации России. Однако для достижения поставленной цели необходимо начать действовать уже сегодня.

Экспертами, принявшими участие в исследовании Ассоциации, были предложены следующие возможные пути совершенствования инженерного образования России:

использование компетентностного подхода при проектировании и реализации инженерных образовательных программ;

использование практико-ориентированных образовательных технологий, формирование новых и исключительных компетенций;

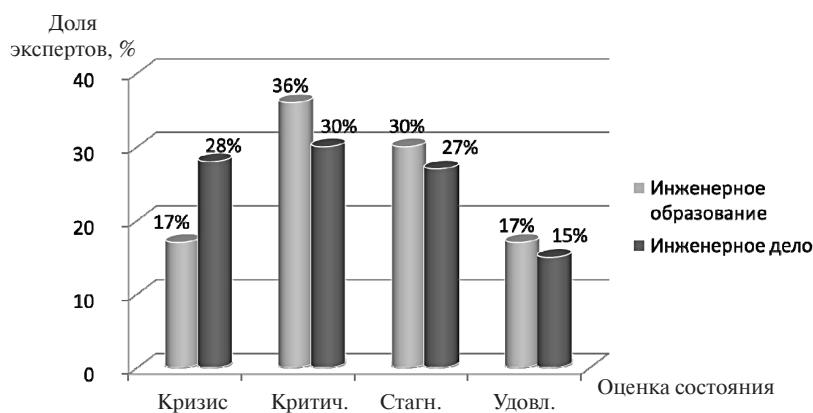


Рис 3. Сравнительная экспертная оценка состояния инженерного дела и инженерного образования в России



использование потенциала промышленности при подготовке инженеров;

подготовка специалистов с учетом их способностей и наклонностей;

обучение работе в команде.

Уровень подготовки современных специалистов с высшим образованием в области техники и технологии зависит от многих факторов, начиная от качества подготовки абитуриентов и заканчивая интерьером университетских аудиторий. Не претендуя на абсолютную полноту перечня этих факторов, отметим, что он, безусловно, должен включать уровень проводимых на кафедрах научных исследований, состояние и современность научного и учебного лабораторного оборудования, качество реализуемых образовательных программ, используемых учебно-методических материалов, выбранных образовательных технологий и, разумеется, уровень и качество профессорско-преподавательского состава. При разработке и реализации образовательных программ необходимо применение компетентностного подхода, который призван обеспечить формирование общих, профессиональных и личностных компетенций у выпускников технических вузов [5]. Использование компетентностного подхода предполагает:

проектирование инженерных образовательных программ на основе профессиональных стандартов;

определение перечня необходимых компетенций для бакалавра, специалиста, магистра;

выполнение реальных проектов во время обучения;

включение в учебные программы производственных и технологических практик на современных предприятиях.

Однако наличие у выпускника инженерного вуза набора компетенций (знания, умения и навыки, позволяющие использовать известные алгоритмы) — необходимое, но недостаточное условие для разработки инновационных технологий и решений, способных привести к технологической модернизации. Сегодня перед университетами стоит задача подготовки компетентных специалистов, способных решать конструкторские, технологические, эксплуатационные и управленические проблемы, а главное, находить новые инженерные реше-

ния, обеспечивающие победу в конкуренции на мировых рынках. Компетентность в данном аспекте представляется как способность подготовленных специалистов использовать сформированные у них компетенции для решения реальных задач, для проявления творчества и реализации инноваций [6].

Для подготовки инженеров такого уровня потребуется система оценки качества, позволяющая проверить не наличие знаний, навыков и умений, а способность их применения при решении реальных инженерных задач [7]. И здесь речь идет не о привычном для нас мониторинге остаточных знаний. О компетентности специалиста нельзя судить только по полученным оценкам за экзамены. В первую очередь необходимо разработать систему критериев и индикаторов, характеризующих уровень компетентности специалиста на разных этапах обучения. При разработке данной системы особенно важно учесть ожидания и требования, предъявляемые к будущим инженерам не только академическим сообществом, представителями промышленности, но и обществом в целом. В работе над формированием системы критериев должен быть принят во внимание, например, и такой показатель, как профессиональная и социальная ответственность инженера [8].

Другой отличительной чертой системы оценки компетентности специалистов должна стать возможность своевременного выявления недостаточного уровня компетентности по тем или иным критериям, что означает возможность внесения корректирующих изменений во время подготовки. Для этого разрабатываемая система должна быть информационно-адаптивной, т. е. по результатам проведенной оценки должны формироваться соответствующие рекомендации для всех заинтересованных результатом обучения (студент, преподаватель, заведующий кафедрой, потенциальный работодатель и др.). К тому же, нельзя забывать, что в современном динамично развивающемся обществе постоянно появляются новые вызовы внешней среды. Поэтому в системе управления вузом должны быть предусмотрены инструменты и механизмы, позволяющие быстро и эффективно оценивать и регулировать качество подготовки специалистов и адаптировать систему к изменяющимся внешним условиям. Это даст возможность гото-



вить и воспитывать в вузе специалистов-профессионалов, способных включиться в решение реальных задач производства без какого-либо периода адаптации, который сегодня длится от полугода до двух лет. Решение такой задачи требует грамотного применения практико-ориентированных технологий подготовки специалистов в области техники и технологии, проблемно-ориентированных и проектно-организованных методов их обучения. Чрезвычайно важный фактор — участие в учебном процессе высококвалифицированных экспертов из научно-образовательной и производственной сферы, что позволит не только сократить период адаптации

специалистов на производстве, но и подготовить их к работе в условиях рыночной экономики, где для достижения успеха требуется победа в конкурентной борьбе.

Именно такие «заряженные на победу» инженеры-профессионалы, способные ставить и решать задачи в развитии научно-технической сферы, могут совершить инновационный прорыв в своей профессиональной сфере и, следовательно, в экономике России в целом. Обеспечение экономики страны кадровыми ресурсами такого качества наряду с принятием эффективных экономических и политических решений — важнейшие составляющие технологической модернизации России.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Путин, В.В.** Нам нужна новая экономика [Электронный ресурс] // Электронное периодическое издание «Ведомости» 30.01.2012 URL: [http://www.vedomosti.ru/politics/news/1488145/o\\_nashih\\_ekonomicheskikh\\_zadachah](http://www.vedomosti.ru/politics/news/1488145/o_nashih_ekonomicheskikh_zadachah) (дата обращения: 06.02.12)

2. Материалы тренинга «Инженерное дело и инженерное образование в России. Проблемы и пути их решения с участием АИОР» [Электронный ресурс].— Режим доступа: <http://aeer.ru/events/ru/trainings.htm>

3. **Указ Президента РФ** от 7 июля 2011 г. N 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации» [Электронный ресурс].— Режим доступа: <http://text.document.kremlin.ru/SESSION/PILOT/main.htm>

4. **Рекомендации** участников парламентских слушаний по теме «Развитие инженерного образования и его роль в технологической модернизации России» 12.05.2011[Электронный ресурс].— Режим доступа:

[aeer.ru/files/recommendation-12.doc](http://aeer.ru/files/recommendation-12.doc) (дата обращения: 14.02.12)

5. **Smith, M.K.** Competence and competencies// *The encyclopaedia of informal education*. [Электронный ресурс].— Режим доступа: <http://www.infed.org/biblio/b-comp.htm>

6. **Johnson & Wales University Competency Model, Employee Development Inst** [Электронный ресурс].— Режим доступа:— URL: <http://www.jwu.edu/uploaded-Files/Documents/Careers/JWUEmployeeDev-CompetencyModel.pdf> (дата обращения: 01.02.2012).

7. **Дульзон, А.А., Васильева, О.М., Волостнов, И.В., Истигечева, Л.А.** Резерв кадров: планирование, отбор, развитие и оценка [Текст] / Монография / А.А. Дульзон, О.М. Васильева, И.В. Волостнов, Л.А. Истигечева.— Томск: Изд-во ТПУ, 2009.— 291 с.

8. **International Engineering Alliance: Graduate Attributes and Professional Competencies** Version 2— 18 June 2009 [Электронный ресурс].— Режим доступа: <http://www.washingtonaccord.org/IEA-Grad-Attr-Prof-Competencies-v2.pdf> (дата обращения: 16.02.2012).



## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

### КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ

**АБАКШИН Антон Юрьевич** — аспирант кафедры двигателей внутреннего сгорания Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-77-85  
shuher87@bk.ru

**АНТОЩЕНКО Татьяна Владимировна** — студентка V курса кафедры машин и технологий обработки металлов давлением Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-95-30  
a7725@yandex.ru

**АРЕФЬЕВ Валентин Константинович** — старший научный сотрудник ОАО “НПО ЦКТИ”

194021 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.24 ОАО “НПО ЦКТИ”

(812) 292-90-50  
vka@pochta.ru

**АРЕФЬЕВ Константин Максимович** — доктор технических наук профессор кафедры компьютерных технологий и эксперимента в теплофизике Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 294-42-76

**АТОЯН Грант Левонович** — аспирант кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях, научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 294-22-62  
ato.bmg@gmail.com

**БАШЕНКО Всеволод Владимирович** — доктор технических наук профессор кафедры сварки и лазерных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-63-55

**БЕЛИЯЕВ Александр Евгеньевич** — главный конструктор ООО «ИТС-инжиниринг».

107113, Россия, г. Москва, Сокольническая площадь, 4 А  
(495) 661-67-48  
office@ets-engineering.ru

**БЛАГОВЕЩЕНСКИЙ Анатолий Яковлевич** — доктор технических наук профессор кафедры реакторо- и парогенераторостроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, Заслуженный деятель науки РФ, капитан 1 ранга в отставке.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, СПбГПУ

(812)552-45-61

**БОГОВ Игорь Александрович** — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой турбиностроения и средств автоматики Санкт-Петербургского института машиностроения (ПИМаш)

195197, Россия, г.Санкт-Петербург, Полюстровский пр., д. 14, ПИМаш  
(812)540-30-48  
iabog@mail.ru

**БОРОДКИН Алексей Васильевич** — студент V курса кафедры машин и технологии обработки металлов давлением Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-95-30  
mr.borodkingo@mail.ru

**ВАГАНОВ Вячеслав Владимирович** — кандидат технических наук профессор, заместитель заведующего кафедрой полиграфических машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 294-42-15  
prvaganov\_spb@mail.ru

**ВАН ЦИН ШЕН** — аспирант кафедры исследований структуры и свойств материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-89-69

**ВИКТОРЕНКОВА Светлана Владимировна** — кандидат технических наук доцент начальник управления информационно-аналитического обеспечения Санкт-Петербургского гуманитарного университета профсоюзов.  
192238, г. Санкт-Петербург, ул. Фучика, 15  
(812) 380-20-55 (доб. 474)

**ВОЛКОВА Евгения Николаевна** — инженер 2-й категории кафедры физической химии, микро- и нанотехнологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 552-63-87  
ezhik82@mail.ru

**ВОХМЯНИН Сергей Михайлович** — доктор технических наук профессор кафедры турбостроения и средств автоматики Института машиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195197, Россия, г. Санкт-Петербург, Полюстровский пр., д. 14, ПиМаш  
(812) 540-30-48  
smv.nv@mail.ru

**ГВОЗДЯКОВ Дмитрий Васильевич** — ассистент кафедры атомных и тепловых электростанций Энергетического института Томского политехнического университета.

634034, г. Томск, ул. Усова, 7  
dim2003@tpu.ru

**ГЛАЗКОВ Андрей Владимирович** — аспирант кафедры машин и технологий обработки металлов давлением Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 552-95-30  
glazkov\_av@mail.ru

**ГРАЧЕВ Алексей Андреевич** — магистр ассистент кафедры транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 552-84-01  
ptsm@mail.ru

**ГУБИН Владимир Евгеньевич** — кандидат технических наук доцент кафедры атомных и тепловых электростанций, заместитель проректора по административно-хозяйственной и социальной работе Энергетического института Томского политехнического университета.

634034, г. Томск, ул. Усова, 7  
(3822) 440-858  
gubin@tpu.ru

**ГУМЕНЮК Василий Иванович** — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 248-92-13  
kaf-uzchs@mail.ru

**ДЕМИДОВ Александр Иванович** — профессор кафедры физической химии, микро- и нанотехнологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 552-63-87

**ДЕРКАЧ Валерий Николаевич** — кандидат технических наук докторант кафедры строительных конструкций и материалов Санкт-Петербургского политехнического университета, заместитель директора «Научно-технического центра» — филиала Республиканского унитарного предприятия «Институт БелНИИ».

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
+375-(162)-41-19-61  
v-derkatch@yandex.ru

**ДОБРЕЦОВ Роман Юрьевич** — кандидат технических наук доцент, заместитель заведующего кафедрой колёсных и гусеничных машин по учебной работе Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 534-14-31  
kgm-spb@mail.ru

**ЕЛИСТРАТОВ Виктор Васильевич** — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой возобновляемых источников энергии и гидроэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, Заслуженный энергетик РФ.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 552-77-71  
elistratov@cef.spbstu.ru

**ЖЕЛЕЗНЯКОВ Александр Борисович** — советник президента Ракетно-космической корпорации «Энергия».

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр. 21  
(812) 516-27-46  
zheleznyakov@rsce.ru



**ЗЕЛЕНИН Александр Сергеевич** — студент кафедры электрических станций и автоматизации энергосистем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, СПбГПУ  
(812) 534-48-00  
zel\_set@mail.ru

**ЗУЕВ Анатолий Васильевич** — доктор технических наук профессор кафедры компрессорной вакуумной и ходильной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета,

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, СПбГПУ  
(812) 552-65-87  
ascomp@mebil.stu.neva.ru

**ИВАНОВ Александр Васильевич** — доктор технических наук профессор директор Департамента по печати и научно-учебному книгоизданию, заведующий кафедрой полиграфических машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, СПбГПУ  
(812) 552-75-26  
ivanov@mediabooks.ru

**КАРАСЁВ Михаил Валентинович** — доктор технических наук генеральный директор ЗАО НПФ «ИТС» (Санкт-Петербург)

194292, г. Санкт-Петербург, Парнас, Домостроительная ул., д. 2, литера Б  
(812) 321-61-61

**КИСЕЛЁВ Владимир Геннадьевич** — доктор технических наук профессор кафедры промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, улица Политехническая, 29, СПбГПУ  
(812) 247-48-28  
kis\_vg@mail.ru

**КОРАБЛЁВ Вадим Васильевич** — доктор физико-математических наук профессор кафедры физической электроники, советник ректората Санкт-Петербургского государственного Политехнического университета, эксперт Ученого совета Института стратегического сотрудничества между КНР и РФ при университете Цинхуа (КНР).

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, СПбГПУ  
(812) 297-20-88  
korablev@spbstu.ru

**КОТОВ Константин Анатольевич** — соискатель Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, улица Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 352-47-46  
konstantan515@mail.ru

**КОТОВ Сергей Анатольевич** — кандидат технических наук доцент кафедры пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, улица Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 552-80-90

**КРУТОЛАПОВ Александр Сергеевич** — кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России

196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149  
(812) 645-20-21

**КУЗНЕЦОВ Владимир Леонидович** — аспирант кафедры электрических станций и автоматизации энергосистем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, СПбГПУ  
(812) 534-48-00

**КУЗНЕЦОВ Гений Владимирович** — доктор физико-математических наук профессор, заместитель директора по научной работе Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

634034, г. Томск, ул. Усова, 7  
(3822) 56-36-13  
elf@tpu.ru

**КУКОЛЕВ Максим Игоревич** — доктор технических наук профессор кафедры двигателей внутреннего сгорания Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, СПбГПУ  
(812) 552-77-85  
m\_kukolev@mail.ru

**КУРИЛЕНКО Николай Ильич** — кандидат физико-математических наук доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Строительного института Тюменского государственного архитектурно-строительного университета.

625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, д. 2  
(3452) 43-42-27  
ktgv@tgasu.ru

**КУЛИНКОВИЧ Алексей Викторович** — кандидат химических наук докторант кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях факультета комплексной безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 248-91-93  
geochem@mail.ru

**ЛАТЫШЕВ Дмитрий Викторович** — заведующий лабораторией кафедры строительных конструкций Новгородского государственного университета им. Я. Мудрого.

173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 41  
(8162) 73-06-42

**ЛЕОНТЬЕВ Роман Алексеевич** — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ  
(812) 552-65-66  
raleontev@rambler.ru

**МАКАР Юрий Васильевич** — аспирант кафедры технологий машиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ  
(812) 552-76-64  
makar@advel.org

**МАКСИМОВ Вячеслав Иванович** — кандидат технических наук доцент кафедры теоретической и промышленной теплотехники Энергетического института Томского политехнического университета..

634034, г. Томск, пр. Ленина 30  
(3822) 43-08-33  
elf@tpu.ru

**МАЛЬЦЕВ Александр Александрович** — ассистент кафедры проектирования специальных лесных машин Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета.

194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5  
(812) 670-93-69

**МАМОНТОВ Геннадий Яковлевич** — доктор физико-математических наук профессор кафедры прикладной математики общеобразовательного ф-та Томского государственного архитектурно-строительного университета.

634003, г. Томск, пл. Соляная, 2  
(382-2) 66-08-28  
mamontov@tsuab.ru

**МАМУТОВ Вячеслав Сабайдинович** — доктор технических наук профессор кафедры машин и технологий обработки металлов давлением Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ  
(812) 552-95-30  
vmamutov@mail.ru

**МИНИНА Алена Андреевна** — аспирант кафедры возобновляемых источников энергии и гидроэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ  
(812) 552-77-71  
minina\_aa@mail.ru

**МАРКОВ Александр Николаевич** — кандидат технических наук доцент кафедры технологий лесного машиностроения и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета

194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5  
(812) 550-07-49

**МАРКОВ Виктор Александрович** — кандидат технических наук доцент кафедры технологий лесного машиностроения и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета

194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5  
(812) 550-07-49

**МАСЛИКОВ Владимир Иванович** — доктор технических наук профессор кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ  
(812) 297-59-28  
vmaslikov@list.ru

**МИТЮКОВ Андрей Аркадьевич** — мастер строительно-монтажных работ ООО «Технокомплекс».

173008, г. Великий Новгород, ул. Рабочая д. 59  
(8162) 616-468

**МИХЕЕВ Павел Юрьевич** — старший преподаватель, аспирант кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ  
(812) 297-59-94

**МИШАКОВ Владимир Александрович** — кандидат технических наук директор НПСФ «СпецСтройСервис»

192029, г. С-Петербург, Общественный пер., д. 5, лит. А., ООО НПСФ «СпецСтройСервис»  
(812) 380-08-95



**МОЛОДЦОВ Дмитрий Владиславович** — аспирант кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ  
(812) 297-59-28  
kovu@bigcats.ru

**МУРАШКИН Сергей Леонидович** — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой технологии машиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ  
(812) 552-76-64  
tm@mmf.spbstu.ru

**НАГОРНОВА Татьяна Александровна** — кандидат технических наук доцент кафедры теоретической и промышленной теплотехники Энергетического института Томского политехнического института.

634034, г. Томск, пр. Ленина 30  
(3822) 42-08-33  
Tania@tpu.ru

**НЕГУЛЯЕВА Екатерина Юрьевна** — кандидат технических наук доцент кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ  
(812) 297-9-28  
kneg@rambler.ru

**НИКИТКОВ Николай Валентинович** — доктор технических наук профессор кафедры технологии машиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ  
(812) 552-76-64  
nnvnvi@mail.ru

**НОВИКОВ Виталий Иванович** — кандидат технических наук доцент кафедры технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ  
(812) 552-93-02  
vitalynewage@gmail.com

**НОЗДРИН Глеб Алексеевич** — аспирант кафедры двигателей внутреннего сгорания Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812)552-77-85  
jabboid@yandex.ru

**ОХАПКИН Кирилл Алексеевич** — аспирант кафедры сварки и лазерных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812)552-63-55  
kirill.okhaphkin@mail.ru

**ПАВЛОВ Константин Анатольевич** — инженер ООО «ИТС-инжиниринг».

107113, Россия, г. Москва, Сокольническая площадь, 4 А  
(495) 661-67-48  
office@ets-engineering.ru

**ПЕЛЕВИН Никита Александрович** — студент кафедры гибких автоматических комплексов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 534-13-88  
twic@inbox.ru

**ПЕТРИЧЕНКО Михаил Романович** — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой гидравлики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812)552-64-01  
fonpetrich@mail.ru

**ПЕТРОВ Михаил Юрьевич** — старший преподаватель кафедры строительных конструкций Новгородского государственного университета им. Я. Мудрого

173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 41  
(8162) 73-06-42

**ПЕТРОЧЕНКО Марина Вячеславовна** — старший преподаватель кафедры гидравлики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812)552-64-01  
mpetrochenko@mail.ru

**ПИСКАРЕВ Павел Юрьевич** — студент кафедры гибких автоматических комплексов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 534-13-88  
muradji@yandex.ru

**ПОЛИЩУК Михаил Нусимович** — кандидат технических наук доцент кафедры автоматов Санкт-Петербургского государственного технического университета.

195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 552-96-86  
polishchuck@mail.ru

**ПОПОВ Аркадий Николаевич** — кандидат технических наук профессор кафедры автоматов Санкт-Петербургского государственного технического университета.

195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 552-96-86  
porka.n@mail.ru

**ПОПОВ Владимир Алексеевич** — кандидат технических наук доцент кафедры художественной и пластической обработки материалов Новгородского государственного университета им. Я. Мудрого.

173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 41  
(8162)62-66-14

**ПОПОВ Максим Георгиевич** — кандидат технических наук доцент кафедры электрических станций и автоматизации энергосистем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ  
(812) 534-48-00

**ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич** — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой исследования структуры и свойств материалов, исполнительный директор ОНТИ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ  
(812) 552-89-69  
popovicha@mail.ru

**ПОХОЛКОВ Юрий Петрович** — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой организации и технологии высшего профессионального образования Научно-исследовательского Томского политехнического университета, президент Ассоциации инженерного образования России

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
(3822) 42-14-78  
pyuori@mail.ru

**ПРОКОПЕНКО Вячеслав Алексеевич** — кандидат технических наук доцент кафедры гибких автоматических комплексов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 534-13-88  
mmfgak@mail.ru

**РАБОТИНСКИЙ Дмитрий Николаевич** — инженер ЗАО НПФ «ИТС» (Санкт-Петербург).

194292, г. Санкт-Петербург, Парнас, Домостроительная ул., д. 2, литера Б  
(812) 321-61-61

**РАЗУМОВ Николай Геннадьевич** — аспирант кафедры исследования структуры и свойств материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 552-89-69  
n.razumov@inbox.ru

**РАССОХИН Виктор Александрович** — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ  
(812) 552-65-66  
v-rassokhin@yandex.ru

**РОЖКОВА Светлана Владимировна** — доктор физико-математических наук профессор кафедры высшей математики Научно-исследовательского Томского политехнического университета, ведущий научный сотрудник кафедры организации и технологий высшего профессионального образования НИ ТПУ.

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
(3822) 42-14-76  
rozhkova@tpu.ru

**РОЗОВ Андрей Леонидович** — доктор технических наук профессор кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 294-22-62  
rozov20@mail.ru

**РОМАНОВ Павел Иванович** — доктор технических наук профессор директор научно-методического центра УМО вузов России, профессор кафедры гибких автоматизированных комплексов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ  
(812) 294-21-65  
pavelromanov-umo@yandex.ru

**РУСИНА Надежда Юрьевна** — научный сотрудник научно-исследовательского центра безопасности технических систем 12-го центрального научно-исследовательского института Министерства обороны Российской Федерации

197375, г. Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 39  
rozov20@mail.ru



**РУСИНОВ Ростислав Викторович** — *доктор технических наук профессор кафедры колесных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ  
(812) 534-14-31  
kgm-spb@list.ru

**СИЛИН Алексей Олегович** — *ведущий инженер кафедры исследования структуры и свойств материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ  
(812) 552-89-69

**СИНЯКОВ Леонид Николаевич** — *кандидат технических наук доцент кафедры подземных сооружений, основания и фундаментов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ  
(812) 535-63-03

**СМОЛОВИК Сергей Владимирович** — *доктор технических наук профессор заместитель заведующего отделом проектирования и развития энергосистем ОАО «НИИПТ».*

194223, г. С-Петербург, ул. Курчатова, 1, Лит А,  
smolovik@niipt.ru

**СОКОЛОВ Владимир Алексеевич** — *кандидат технических наук профессор заведующий кафедрой строительных конструкций и материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ  
(812) 535-16-32  
sva0808@rambler.ru

**СОКОЛОВ Сергей Алексеевич** — *доктор технических наук профессор кафедры транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ  
(812) 552-84-01  
pts@mail.ru

**СТЕПЕНКОВА Наталья Алексеевна** — *сотрудник ОАО «ДТСС».*

198095, Санкт-Петербург, Промышленная ул., д. 7,  
(812) 786-19-10  
info@sstc.spb.ru

**СТРАХОВ Дмитрий Александрович** — *кандидат технических наук профессор кафедры строительных конструкций и материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ  
(812) 535-16-32

**СЫРОВ Александр Александрович** — *кандидат технических наук инженер I категории ЗАО «Диакон» (г. Санкт-Петербург).*

195274, Санкт-Петербург, ул. Учительская, д. 2, ЗАО «Диакон»  
(812) 334-00-81

**СЫСОЕВ Алексей Васильевич** — *аспирант кафедры электрических систем и сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
sysoev-alexey@mail.ru

**СЫЧЕВ Дмитрий Александрович** — *Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России*

196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149  
(812) 645-20-21

**ТАНАНАЕВ Анатолий Васильевич** — *доктор технических наук профессор кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 297-59-94

**ТОЛКАЧЕВА Ксения Константиновна** — *аспирант кафедры организации и технологии высшего профессионального образования Научно-исследовательского Томского политехнического университета.*

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
(3822) 42-14-76  
tolkacheva@tpu.ru

**ТОЛМАЧЁВ Валерий Вячеславович** — *аспирант, доцент кафедры турбостроения и средств автоматики Санкт-Петербургского института машиностроения (ПИМаш).*

195197, Россия, г.Санкт-Петербург, Полюстровский пр., д. 14, ПИМаш  
(812) 540-30-48  
pim\_tolm@mail.ru

**УСМАНОВА Регина Равилевна** — *кандидат технических наук доцент старший научный сотрудник Государственного автономного научного учреждения «Институт прикладных исследований» Академии наук Республика Башкирия.*

453103, Башкортостан, г. Стерлитамак, ул. Одесская, 68, ИПИ АН РБ.  
(3473) 20-59-70  
Usmanovarr@mail.ru

**ФАФИНОВ Максим Александрович** — заведующий сектором ЗАО «Институт энергетического машиностроения и электротехники».

192029, г. Санкт-Петербург, пр. Обуховской обороны, д.51  
(812) 448-22-09 доб. 10-93  
m.fafinov@gerph.ru

**ФЕДОРОВИЧ Евгений Данилович** — доктор технических наук профессор кафедры компьютерных технологий и эксперимента в теплофизике Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 294-42-76

**ФЕДОСОВСКИЙ Михаил Евгеньевич** — кандидат технических наук генеральный директор ЗАО «Диаконт» (г. Санкт-Петербург).

195274, Санкт-Петербург, ул. Учительская, д. 2, ЗАО «Диаконт»  
(812) 334-00-81  
diakont@diakont.ru

**ФОЛОМКИН Андрей Игоревич** — кандидат технических наук доцент кафедры технологий конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета,

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 552-93-02  
folomkin\_ai@mail.ru

**ХАРЛАМОВ Максим Владимирович** — аспирант кафедры архитектурного проектирования Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета.

Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4  
(812) 575-05-10  
kastal.key@gmail.com

**ЧЕМЕКОВ Вячеслав Викторович** — аспирант отдела возобновляемых источников энергии Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства

109456, г.Москва, 1-й Вешняковский проезд, д.2,  
(495)171-14-23  
ch.vyacheslav@gmail.com

**ЧЕРЕМИСИН Алексей Владимирович** — кандидат технических наук доцент кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 297-59-28  
laksacher@yandex.ru

**ЧЕРКАСОВА Лидия Георгиевна** — инженер ЗАО НПФ «ИТС» (Санкт-Петербург).

194292, г. Санкт-Петербург, Парнас, Домостроительная ул. д. 2, литера Б  
(812) 321-61-61

**ЧУСОВ Александр Николаевич** — кандидат технических наук заведующий кафедрой гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 297-59-28  
chusov17@mail.ru

**ШАРКАВИ Мостафа Х.** — профессор отделения механики Университета нефтяных и минеральных ресурсов им. короля Фахда.

Саудовская Аравия, город Дахран  
(812) 294-42-76

**ШЕВЕЛЁВ Александр Николаевич** — доктор педагогических наук профессор заведующий кафедрой педагогики и андрологии Санкт-Петербургской академии постдипломного педагогического образования.

191001, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 11  
(812) 572-27-79  
san0966@mail.ru

**ЮН Владимир Климентьевич** — кандидат технических наук, докторант кафедры компрессорной вакуумной и холодильной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ  
(812) 552-65-87  
vladnzl@rambler.ru



## АННОТАЦИИ

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Железняков А. Б., Кораблев В. В. ОПЫТ ОСВОЕНИЯ КОСМОСА КИТАЙСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКОЙ.

В статье рассмотрены различные аспекты космической деятельности Китайской Народной Республики: исторические сведения о развитии ракетной техники, анализ современного состояния космической отрасли, перспективы освоения космического пространства китайскими учеными и специалистами.

КИТАЙСКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА. КОСМОНАВТИКА. РАКЕТА. СПУТНИК. ЛУНА.

Благовещенский А. Я. НЕКОТОРЫЕ ВЕХИ СОЗДАНИЯ И РАЗВИТИЯ КОРАБЕЛЬНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ (ВОСПОМИНАНИЯ, ВПЕЧАТЛЕНИЯ, РАЗМЫШЛЕНИЯ).

В статье рассматриваются некоторые узловые моменты создания и бурного развития отечественной корабельной ядерной энергетики в недалеком прошлом на фоне нынешнего положения дел в этой области

АТОМНАЯ ПОДВОДНАЯ ЛОДКА (ПЛА). РЕАКТОРНАЯ УСТАНОВКА. АВАРИЙНОЕ РАСХОЛАЖИВАНИЕ. ЕСТЕСТВЕННАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ ТЕПЛОНАСИТЕЛЯ (ЕЦТ). НАДЕЖНОСТЬ. БЕЗОПАСНОСТЬ. ЖИВУЧЕСТЬ.

Киселёв В. Г. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ И КИНЕТИЧЕСКАЯ ТРАКТОВКА ПОТЕНЦИАЛА ПОГРУЖЕНИЯ И ЕГО СВЯЗЬ С КОРРОЗИЕЙ ПО ВАТЕРЛИНИИ.

Рассмотрена термодинамическая и кинетическая трактовка возникновения и постоянства потенциала погружения. Даны оценка влияния потенциала погружения на скорость коррозионных процессов. Повышенное внимание уделено влиянию емкости двойного электрического слоя на скорость коррозии по ватерлинии в зоне брызг энергетического оборудования.

КОРРОЗИЯ ПО ВАТЕРЛИНИИ. ПОТЕНЦИАЛ ПОГРУЖЕНИЯ. ПОТЕНЦИАЛ БИЛЛИТЕРА. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ. КОРРОЗИЯ В ЗОНЕ БРЫЗГ.

Леонтьев Р. А., Рассохин В. А. ОСНОВНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ ГАЗОПАРОВЫХ УСТАНОВОК.

В статье рассмотрены пути повышения экономичности газопаровых установок, газотурбинных установок. Изложены проблемы применительно к современным газопаровым установкам.

ГАЗОПАРОВЫЕ УСТАНОВКИ. ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ. ПАРОВАЯ ТУРБИНА. КОМБИНИРОВАННЫЕ УСТАНОВКИ.

Куриленко Н. И., Максимов В. И., Мамонтов Г. Я., Нагорнова Т. А. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ С РАДИАЦИОННЫМ ИСТОЧНИКОМ НАГРЕВА.

Представлены результаты математического моделирования естественной конвекции в прямоугольной области при наличии радиационного источника нагрева. Исследованы режимы естественной конвекции в области, ограниченной твердыми стенками. Плоская нестационарная задача решена в рамках модели Навье — Стокса для газа и теплопроводности для твердых стенок. Проведен анализ динамики распространения тепла в замкнутой области с течением времени.

СОПРЯЖЕННАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА. РАДИАЦИОННЫЙ ИСТОЧНИК ТЕПЛА. ЧИСЛОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ.

Зеленин А. С., Кузнецов В. Л., Попов М. Г. РАЗРАБОТКА МИКРОПРОЦЕССОРНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНО-ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.

В статье рассмотрены практические решения по реализации задач построения испытательного комплекса. Изложено описание основных элементов разрабатываемого программного обеспечения комплекса.

МОДЕЛИРОВАНИЕ. РЕАЛИЗАЦИЯ. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС. ТЕСТИРОВАНИЕ.



Ноздрин Г. А., Абакшин А. Ю., Куколев М. И. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕМОВ ПРИ РАСЧЕТЕ ДВИГАТЕЛЕЙ С ВНЕШНИМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ ПО ЦИКЛУ ШМИДТА.

В статье представлены материалы для обсуждения улучшенного варианта цикла Шмидта для расчета двигателя Стирлинга.

ДВИГАТЕЛИ СТИРЛИНГА. ДВИГАТЕЛИ С ВНЕШНИМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ. ПОРШНЕВЫЕ ДВИГАТЕЛИ. ЦИКЛ ШМИДТА. МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Сысоев А. В., Соловьев С. В. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАССТАНОВКИ ИСТОЧНИКОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ.

Описывается алгоритм оптимизации распределения реактивного тока по линиям энергосистемы. Алгоритм основан на переборе вариантов установки источников реактивной мощности: из всех возможных выбирается наиболее эффективный с точки зрения критерия минимизации потерь. Работа предложенного алгоритма проверяется на примере энергосистемы.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ. ПОТЕРИ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ. ИСТОЧНИК РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ.

Михеев П. Ю., Тананаев А. В. МЕТОДИКА ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЖИЗНЕННЫХ ЦИКЛОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.

Рассмотрены вопросы эффективности энергетических объектов (электростанции). Разработана методика эксергетического анализа жизненных циклов энергетических объектов. В рамках методики определено понятие жизненного цикла, приведены и обоснованы зависимости для определения затрат эксергии и выработанной электроэнергии в течение жизненного цикла энергетического объекта и сформулирован критерий эффективности. С помощью данной методики можно быстро производить определение, сопоставление и анализ энергоэффективности различных энергетических объектов.

ЭКСЕРГИЯ. ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ. ЗАТРАТЫ ЭКСЕРГИИ. ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ.

Грачев А. А., Соколов С. А. ВЛИЯНИЕ НЕПЛОСКОСТИ ОБЪЕКТОВ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ТОНКОСТЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН.

Рассмотрено влияние первоначального искривления на жесткость пластин, как в отдельности, так и в составе конструкции. Даны рекомендации по оценке действующих напряжений в неплоских пластинах при действии продольных сил.

ПЛАСТИНА. ЖЕСТКОСТЬ. ИСКРИВЛЕНИЕ. НАПРЯЖЕНИЯ. НЕ ПЛОСКОСТЬ.

Макар Ю. В. РАСЧЕТ ЧИСЛА РАБОТАЮЩИХ ЗЕРЕН НА ПЛОЩАДКЕ КОНТАКТА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗАГОТОВОК.

В статье предложена и опробована методика расчета количества работающих зерен на площадке контакта шлифовального круга с заготовкой. Предложенная модель позволяет оценивать эффективность шлифования алмазными кругами.

МЕТОДИКА. МОДЕЛЬ. ШЛИФОВАНИЕ. ЗЕРНО. ГЛУБИНА ВНЕДРЕНИЯ. ПЛОЩАДЬ КОНТАКТА. ПЛОТНОСТЬ ЗЕРЕН.

Пелевин Н. А., Пискарев П. Ю., Прокопенко В. А. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ШПИНДЕЛЬНЫХ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ ТЯЖЕЛОГО РАСТОЧНОГО МОДУЛЯ.

Рассмотрены вопросы совершенствования и повышения технических и эксплуатационных показателей шпиндельных узлов металлорежущих станков. Представлены результаты статических и динамических исследований возможностей различных систем управления и рекомендации по выбору схем управления гидростатическими подшипниками.

ГИДРОСТАТИЧЕСКИЙ ПОДШИПНИК. СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ. ЗАПАС ПО ФАЗЕ. ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС. КОЛЛЕБАТЕЛЬНОСТЬ. ДИНАМИЧЕСКОЕ КАЧЕСТВО. КОРРЕКЦИЯ.

Фоломкин А. И., Мурашкин С. Л. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТОРЦОВЫХ ФРЕЗ С КОРПУСАМИ ИЗ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА.

Рассмотрены основные механические характеристики фибробетона используемого для изготовления торцевых фрез. Показано что прочность фрез с корпусами из стальфифробетона приближается к прочности фрез из чугуна. Определены особенности эксплуатации фрез с корпусами из стальфифробетона.

СТАЛЕФИБРОБЕТОН. ТОРЦОВЫЕ ФРЕЗЫ. ДЕМПФИРОВАНИЕ.



Зуев А. В., Юн В. К., Фафинов М. А. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУХИХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ УПЛОТНЕНИЙ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАГНЕТАТЕЛЯХ ПРИРОДНОГО ГАЗА.

В статье рассмотрены методы расчета сухих газодинамических уплотнений, применяемых в центробежных нагнетателях природного газа. Изложены основные положения теоретического анализа газодинамических сил, возникающих в парах трения.

СГУ. РАСПОРНАЯ СИЛА. ПРОТЕЧКИ. ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ НАГНЕТАТЕЛЬ.

Новиков В. И., Мурashкин С. Л., Фоломкин А. И. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКИ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ.

В работе произведено сравнение методов, которые можно использовать для полирования пера лопатки. Построена объемная модель напряженно-деформированного состояния при полировании рабочей части лопатки. Предложена имитационная модель распределения температур в зоне обработки и режимы электролитно-плазменного полирования лопаток из стали 30ХГСА.

ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЕ ПОЛИРОВАНИЕ. ПЕРО ЛОПАТКИ. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ.

Иванов А. В., Ваганов В. В., Котов К. А. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ ЗАКАЗОВ НА ПОЛИГРАФИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ.

Представлен комплексный подход к оптимальному использованию производительности полиграфического оборудования, в основе которого лежит решение трех взаимосвязанных комбинаторно-оптимизационных задач.

ПРОИЗВОДСТВО. ПРОЦЕСС. ИНТЕРВАЛ. МАТРИЦА. ЗАДАЧА. ИНФОРМАЦИЯ. КРИТЕРИЙ. СХЕМА. ИНТЕРВАЛ. ХАРАКТЕРИСТИКА. РЕСУРСОЕМКОСТЬ.

Романов П. И., Викторенкова С. В. РАЗРАБОТКА СБАЛАНСИРОВАННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ ДЛЯ РЕМОНТА ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН.

Приводится описание результатов исследований по разработке пневматических сбалансированных манипуляторов, предназначенных для механизации ремонта лесозаготовительных машин вне стационарных ремонтных объектов.

МАНИПУЛЯТОР СБАЛАНСИРОВАННЫЙ. РЕМОНТ. ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНАЯ МАШИНА. ПНЕВМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА.

Никитков Н. В., Макар Ю. В. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ЗАГОТОВОК ИЗ ТВЕРДЫХ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ.

В статье рассмотрены вопросы аналитического расчета режимов шлифования алмазными кругами хрупких заготовок. Предложены зависимости для вычисления режимов шлифования твердых хрупких материалов.

РЕЖИМЫ. ПЛОТНОСТЬ ЗЕРЕН. АЛМАЗНЫЕ КРУГИ. ВЫЧИСЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ.

Русинов Р. В., Добрейков Р. Ю. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОВОГО ЦИКЛА «АДИАБАТНОГО» ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С КОМБИНИРОВАННЫМ НАДДУВОМ.

Рассмотрен вопрос эффективности теплового цикла дизеля с теплоизолированными камерами сгорания. Предложена методика расчета, позволяющая на основе параметров теплового цикла определить расход топлива, КПД, мощность двигателя и другие показатели.

ДИЗЕЛЬ. РАБОЧИЙ ЦИКЛ. ЭКОНОМИЧНОСТЬ.

Разумов Н. Г., Попович А. А., Силин А. О. ПОЛУЧЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КРИОГЕННЫХ АЗОТОСОДЕРЖАЩИХ ПОРОШКОВЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ С НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ.

Представлены результаты исследований фазообразования при получении высокоазотистых порошковых сплавов системы Fe-Cr-Ni-Mn-N методом механохимического синтеза. Приведены результаты исследований тонкой кристаллической структуры на высокоразрешающем просвечивающем электронном микроскопе Technai S-Twin G230. Показана типичная нанокристаллическая структура механолегированного высокоазотистого порошкового сплава системы Fe-18Cr-8Ni-12Mn-0,9N.

АММИАК. АТМОСФЕРА. СПЛАВ. АУСТЕНИТ. МЕХАНОЛЕГИРОВАНИЕ. СИНТЕЗ.



## Глазков А. В. ТЕХНОЛОГИЯ ХОЛОДНОЙ ГИБКИ ТРУБ МЕТОДОМ ПРОДОЛЬНОГО РАСКАТЫВАНИЯ.

В статье рассмотрены известные способы гибки труб и возникающие проблемы. Предложена новая технология холодной гибки, позволяющая получить новые технические возможности качественной гибки труб.

ХОЛОДНАЯ ГИБКА. ПРОДОЛЬНОЕ РАСКАТЫВАНИЕ. ШАРОВЫЙ ДОРН. ЗОНА ПЛАСТИЧЕСКОГО ШАРНИРА.

## Котов С. А., Марков В. А., Марков А. Н., Мальцев А. А. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ ПК40Х2, НАНЕСЕННОГО МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО ПРИПЕКАНИЯ

Работа посвящена исследованию интенсивности изнашивания композиционного покрытия, спеченного электроконтактным методом. Произведен выбор подходящего материала и описана методика проведения исследований. Результатом проделанной работы является зависимость интенсивности изнашивания от факторов технологического процесса нанесения покрытия. Установлено, что при использовании композиционных покрытий износостойкость деталей повышается на 64 %.

ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЕ ПРИПЕКАНИЕ. АБРАЗИВНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ. ФАКТОРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА.

## Волкова Е. Н., Демидов А. И. ПОЛУЧЕНИЕ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИ ЧИСТОГО МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ГЕКСАГИДРАТА СУЛЬФАТА НИКЕЛЯ.

В процессе гидрометаллургической переработки активной массы оксидно-никелевых электродов отработанных щелочных аккумуляторов путем кристаллизации из раствора, содержащего серную кислоту, получены монокристаллы гексагидрата сульфата никеля. Приведено теоретическое обоснование возможности получения рентгенографически чистого кристаллического сульфата никеля.

ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЯ. ГЕКСАГИДРАТ СУЛЬФАТА НИКЕЛЯ. РЕТГЕРСИТ. СУЛЬФАТ НИКЕЛЯ. ЩЕЛОЧНЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ. РЕНТЕНОГРАФИЧЕСКИ ЧИСТЫЙ. МОНОКРИСТАЛЛЫ.

## Карасёв М. В., Работинский Д. Н., Черкасова Л. Г., Павлов К. А., Беляев А. Е., Стешенкова Н. А. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ ДЛЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО СУДОСТРОЕНИЯ

В работе предложена классификация сварочного оборудования для дуговой сварки, применяемого в отечественном судостроении, из 6 условных групп. На основе этой классификации определяются дальнейшие пути развития производства отечественного сварочного оборудования для использования в судостроении. Работа представляет интерес для технологов предприятий судостроения в плане обоснованного применения различных сварочных установок для сварки плавящимся электродом в защитных газах.

КЛАССИФИКАЦИЯ. СВАРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ. ДУГОВАЯ СВАРКА. СУДОСТРОЕНИЕ.

## Латышев Д. В., Митюков А. А., Петров М. Ю., Попов В. А. ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ ПРИ ВОЗРАСТАЮЩИХ И ПОСТОЯННЫХ НАГРУЗКАХ. ЧАСТЬ 1.

Приведены результаты экспериментального изучения кратковременной ползучести хромоникелевой стали при нормальной (комнатной) температуре. Испытания тонкостенных трубчатых образцов проводились в условиях постоянной и ступенчато возрастающей нагрузок. При обработке результатов использовалось основная гипотеза упроговязкопластического тела, согласно которой полная неупругая деформация представляется суммой упругой, пластической и вязкопластической компонент.

Установлено, что диаграммы «вязкопластическая деформация — интенсивность неравновесных напряжений» зависят от вида напряженного состояния. Вязкопластическая деформация при высоком уровне полной неупругой деформации сопоставима с мгновенной пластической деформацией, поэтому она должна приниматься во внимание при некоторых видах обработки металлов давлением.

УПРОГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ. ВЯЗКОСТЬ. ИНТЕНСИВНОСТЬ НАПРЯЖЕНИЙ ИДЕФОРМАЦИЙ. МГНОВЕННОЕ НАГРУЖЕНИЕ. НАГРУЖЕНИЕ С ВЫДЕРЖКОЙ ВРЕМЕНИ. ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ. ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ.

## Башенко В. В., Охапкин К. А. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА НА СТРУКТУРУ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ.

В статье приводятся рекомендации по выбору параметров режима точечной сварки трением, обеспечивающих сохранение свойств заготовок на высоком уровне. Проведено экспериментальное исследование влияния термического цикла сварки на структуру и свойства заготовок.

ТОЧЕЧНАЯ СВАРКА ТРЕНИЕМ. ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА. МИКРОТВЕРДОСТЬ. ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫЕ ФАЗЫ.



Абакшин А. Ю., Ноздрин Г. А., Куcolev M. I. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В ЦИЛИНДРАХ ДВИГАТЕЛЯ С ВНЕШНИМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ.

В статье представлены материалы о методах и результатах численного эксперимента, проведенного с целью исследования процессов, протекающих во внутреннем контуре двигателя с внешним подводом теплоты при его работе.

ДВИГАТЕЛИ СТИРЛИНГА. ДВИГАТЕЛИ С ВНЕШНИМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ. ПОРШНЕВЫЕ ДВИГАТЕЛИ. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Чемеков В. В. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ ТЕПЛОВОГО НАСОСА.

В статье рассмотрена методика построения математической модели системы автономного теплоснабжения на базе теплового насоса, основанная на использовании уравнений, описывающих особенности выработки, преобразования и аккумулирования тепловой и электрической энергии.

АВТОНОМНОЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ. ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. ОПТИМИЗАЦИЯ.

Антощенко Т. В., Бородкин А. В., Мамутов В. С. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИКО-ИМПУЛЬСНОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ТОНКОЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОВ ПОДВИЖНОЙ СРЕДОЙ.

Разработана методика расчета на компьютере статико-импульсной вытяжки-формовки подвижными средами с использованием конечно-элементного комплекса LS-DYNA. Методика использована для расчета процесса штамповки детали «мембрана» из тонколистового алюминиевого сплава. Результаты компьютерных расчетов совместно с диаграммами предельных деформаций позволили определить параметры комбинированного нагружения для штамповки детали без разрушения материала заготовки.

СТАТИКО-ИМПУЛЬСНАЯ ВЫТЯЖКА-ФОРМОВКА. ПОДВИЖНЫЕ СРЕДЫ. РАСЧЕТ. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ КОМПЛЕКС LS-DYNA. ДЕТАЛЬ МЕМБРАНА. ДИАГРАММЫ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ. ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕНИЯ.

Толмачев В. В., Богоев И. А., Вожманин С. М. Методика проектировочного РАСЧЕТА ВИХРЕВОГО ЗАПАЛЬНО-СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО МОДУЛЯ ТУРБОУСТАНОВОК.

В статье излагается алгоритм инженерного расчета вихревого запально-стабилизирующего модуля систем розжига турбоустановок. Приводится блок-схема теплового и конструктивного расчета модуля, реализованного на персональном компьютере.

АЛГОРИТМ. РАСЧЕТ. ЗАПАЛЬНАЯ И СТАБИЛИЗИРУЮЩАЯ ГОРЕЛКА. БЛОК-СХЕМА. КАМЕРА СГОРАНИЯ. ТУРБОУСТАНОВКА.

Иванов А. В., Ваганов В. В., Котов К. А. УПОРЯДОЧИВАНИЕ ЗАКАЗОВ ПО МНОЖЕСТВУ КРИТЕРИЕВ ПРЕДПОЧТЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ НЕЙРОСЕТЕВОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СОРТИРОВКИ.

Условие обеспечения оптимальности производственного цикла отдельных заказов на полиграфическом производстве приводит к необходимости решения «задачи ранжировки» с сохранением очередности обработки заказов. Общая последовательность предлагаемой процедуры упорядочивания заказов представлена четырьмя этапами.

КРИТЕРИИ. РАНЖИРОВАНИЕ. ЗАДАЧА. МАТРИЦА. ПРОИЗВОДСТВО. ЛИНИЯ. ПОТОЧНЫЕ. НЕПРЕРЫВНОСТЬ ПРОЦЕССОВ. ИНТЕРВАЛ. АЛГОРИТМ.

Елистратов В. В., Минина А. А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНОЙ ЧАСТИ ВЕТРОВОГО ПОТОКА ЗА КРАТКОСРОЧНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ ВРЕМЕНИ.

В исследовании рассмотрен вопрос нахождения математической модели ветра, учитывающей внутриядовую связь экспериментально полученных значений скорости ветра и применимой для прогнозирования на краткосрочных периодах.

МОДЕЛЬ ВЕТРА. КРАТКОСРОЧНЫЙ. ВНУТРИЯДОВЫЙ. ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ. ПРОГНОЗ. УДЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ.

Попов А. Н., Полищук М. Н. АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РУКАВНЫХ СПАСАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ЧС.

В статье рассмотрены проблемы повышения эффективности использования рукавных спасательных устройств при ликвидации чрезвычайных ситуаций. Рассмотрены аналитические модели и получены оценки основных характеристик процесса эвакуации с помощью спасательных рукавов.

ЧРЕЗВЫЧАЙНАЯ СИТУАЦИЯ. РУКАВНОЕ СПАСАТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО. АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ТЕОРИЯ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ.



## Гвоздяков Д. В., Губин В. Е., Кузнецов Г. В. ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ФОРМИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ АТМОСФЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ.

Представлены результаты численной оценки условий образования серной кислоты в воздушном пространстве, прилегающем к тепловой электрической станции. Определены границы территории, над которыми возможно образование кислотных осадков в различные времена года. Установлен диапазон возможного изменения абсолютной концентрации серной кислоты в области образования осадков.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ТЕПЛООБМЕН. СМЕШАННАЯ КОНВЕКЦИЯ. ТЕПЛОВАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ. ЗАГРЯЗНЕНИЕ. ДЫМОВЫЕ ГАЗЫ. СЕРНАЯ КИСЛОТА.

## Крутолапов А. С. МЕТОДИКА ОБНАРУЖЕНИЯ И КОРРЕКЦИИ ПРЕРЫВАНИЙ ВНЕ ПРОТОКОЛА В СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ МЧС РОССИИ.

Рассмотрена методика обнаружения и коррекции прерываний вне протокола в сетях передачи данных ГПС МЧС России. Методика предполагает четыре основных этапа: определение спецификации протокола, соответствующей нормальному режиму эксплуатации; формирование и проверка допустимости объединенных состояний; формирование процедуры фиксации времени логического пути; восстановление процессов информационного обмена. Каждый из этапов предполагает разработку соответствующего программного обеспечения.

СЕТЬ. ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ (АСДУ). СТРУКТУРА. ПРОТОКОЛ. ПРЕРЫВАНИЕ ВНЕ ПРОТОКОЛА. СБОЙ. МЕХАНИЗМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОТ ОШИБОК. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ.

## Розов А. Л., Русина Н. Ю., Атоян Г. Л. О РАЗРУШЕНИИ БЕТОННЫХ ПЛОТИН НА МЯГКОМ ОСНОВАНИИ. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ПРОРАНА В ОСНОВАНИЙ МНОГОСЕКЦИОННЫХ ПЛОТИН.

Приведена физико-математическая модель процесса разрушения бетонных плотин на основании из местных материалов (на мягком основании) посредством придонного течения в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка. Разработан численный алгоритм, предполагающий постановку особых условий при интегрировании уравнений в случае размыва секций многосекционных плотин. Получено решение указанной системы посредством явной одношаговой схемы интегрирования (метод Рунге—Кутты — Фельберга) — как для односекционных, так и для многосекционных плотин. Схема модифицирована с учетом сформулированных особых условий на секции плотины. Построены графики развития прорана и уровня воды в водохранилище. Модель актуальна для оценки ущерба от последствий распространения волны прорыва необходимо для разработки и принятия мер для защиты от возможных последствий чрезвычайных ситуаций, связанных с катастрофическим разрушением плотин.

БЕТОННАЯ ПЛОТИНА. МЯГКОЕ ОСНОВАНИЕ. ПРОРАН. ВОЛНА ПРОРЫВА. РАЗРУШЕНИЕ ПЛОТИН. РАЗМЫВ. МОДЕЛЬ. ЧРЕЗВЫЧАЙНАЯ СИТУАЦИЯ.

## Гуменюк В. И., Федосовский М. Е., Сыров А. А., Атоян Г. Л. ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ.

В статье рассмотрены принципы и методы построения защиты систем управления (СУ) критически важных объектов (КВО) от поражающих факторов техногенных аварий и катастроф, учитывающие механические, термические, электромагнитные, радиационные и другие воздействия. Выделены основные виды уязвимости СУ: объективные, субъективные и случайные. Приведен алгоритм построения защиты СУ на основе анализа уязвимостей и угроз, рассмотрены направления снижения уязвимости СУ КВО. Предложены схемы защиты СУ КВО от поражающих факторов на основе классического принципа эшелонированной защиты.

критически важные объекты. система управления. поражающие факторы. защита систем управления. анализ уязвимостей и угроз. защищенность. снижение уязвимости.

## Крутолапов А. С., Сычев Д. А. ПРОЦЕССЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ПОЛЕВЫХ ШИН.

Построена математическая модель процессов информационного обмена, которая базируется на математическом аппарате многопотоковых систем массового обслуживания сложной структуры и отличается использованием замкнутых сетей Маркова для описания трафика сообщений. Она позволяет оптимизировать управление ресурсами сети.

СЕТЬ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ. СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ. МНОГОПОТОКОВАЯ СЕТЬ. КАНАЛ. ПОЛЕВЫЕ ШИНЫ. ПОТОК ИНФОРМАЦИИ. ПУАССОНОВСКИЙ ПОТОК. ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ. ТРАФИК. СРЕДНЯЯ ЗАДЕРЖКА СООБЩЕНИЙ. ТОПОЛОГИЯ СЕТИ.



**Масликов В. И., Чусов А. Н., Негуляева Е. Ю., Черемисин А. В., Молодцов Д. В. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛОЖЕНИЯ ОТХОДОВ В БИОРЕАКТОРАХ ДЛЯ ОЦЕНКИ БИОГАЗОВОГО ПОТЕНЦИАЛА И ВЫБОРА МЕРОПРИЯТИЙ ПО РЕКУЛЬТИВАЦИИ ПОЛИГОНОВ ТБО.**

Обосновывается целесообразность проведения экспериментов по исследованию процессов разложения модельных образцов отходов в биореакторах. Для оценки *in situ* состояния и воздействия полигонов твёрдых бытовых отходов (ТБО) на природную среду необходимо выполнение долговременных трудоемких натуральных наблюдений. Большого внимания заслуживают расчётные методы оценки с использованием данных лабораторных исследований в биореакторах, где воссозданы условия протекания биохимических процессов в теле полигона. Они позволяет в короткий срок получить необходимую информацию о процессах разложения отходов на полигонах, оценить биогазовый потенциал, степень их минерализации на различных стадиях биохимических процессов и выбрать мероприятия по рекультивации полигонов ТБО.

**ТВЕРДЫЕ БЫТОВЫЕ ОТХОДЫ. ГАЗОВЫЕ И ВОДНЫЕ ЭМИССИИ. БИОГАЗОВЫЙ ПОТЕНЦИАЛ. МИНЕРАЛИЗАЦИЯ. БИОРЕАКТОРЫ. МЕРОПРИЯТИЯ ПО РЕКУЛЬТИВАЦИИ ПОЛИГОНОВ.**

**Арефьев К. М, Арефьев В. К., Федорович Е. Д., Шаркави М. Х. ТЕПЛОМАССООБМЕН В СИСТЕМЕ ОПРЕСНЕНИЯ МОРСКОЙ ВОДЫ С СОЛНЕЧНЫМ НАГРЕВАТЕЛЕМ.**

Анализируются тепломассообменные процессы, происходящие в оборудовании одной из возможных систем орошения морской воды, использующей солнечный энергисточник. Циркулирующий в системе воздух увлажняется морской водой, затем подогревается в солнечном нагревателе и поступает в осушитель — конденсатор, охлаждаемый поступающим в систему потоком морской воды. Опреснённый конденсат направляется потребителю. Рассмотрен процесс конденсации в теплообменнике — осушителе пластинчатого типа.

**ОПРЕСНЕНИЕ МОРСКОЙ ВОДЫ. ТЕПЛОМАССООБМЕН. ПЛАСТИНЧАТЫЙ ТЕПЛООБМЕННИК. КОНВЕКТИВНАЯ ТЕПЛООТДАЧА К МОРСКОЙ ВОДЕ. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ВЛАЖНОСТЬ. КОНДЕНСАЦИЯ ИЗ ПАРОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ.**

**Усманова Р. Р. РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ РАЦИОНАЛЬНОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ АППАРАТОВ ГАЗООЧИСТКИ.**

На основании экспериментальных исследований проанализировано влияние основных конструктивных и режимных параметров на эффективность и гидравлическое сопротивление вихревого аппарата. Разработан метод расчета, позволяющий установить оптимальные сепарационные характеристики аппаратов вихревого типа. Критерием оптимизации служит минимальная стоимость газоочистки при максимальной эффективности сепарации.

**МЕТОД РАСЧЕТА. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗООЧИСТКИ. ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. КОНСТРУКЦИЯ. СТОИМОСТЬ ГАЗООЧИСТКИ. ВИХРЕВОЙ АППАРАТ.**

**Попович А. А., Ван Цин Шен. ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АНОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЛИТИЙ-ИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ.**

На экспериментальной установке получены и модифицированы анодные матрицы для литий-ионных (полимерных) аккумуляторов из возобновляемого растительного сырья: побегов бамбука и тростникового сахара. С помощью современных методов электронно-сканирующей микроскопии и рентгенофазового анализа выявлены особенности структуры полученных анодных матриц. Представлены результаты исследований удельной поверхности порошка, структуры поверхности частиц, а также результаты измерения предельно-допустимых и оптимальных показателей анодного материала.

**АНОД. ЛИТИЙ-ИОННЫЙ АККУМУЛЯТОР. РАСТИТЕЛЬНОЕ СЫРЬЕ. БАМБУК. САХАРНЫЙ ТРОСТНИК.**

**Кулинкович А. В. ОБРАЗОВАНИЕ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ СОЛЕЙ УРАНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ.**

Показана сложность экспрессного контроля соединений урана в природных водах. Исследовано влияние электромагнитных полей на генерацию активных форм кислорода в водных растворах соединений урана. Наблюдаемый характер нелинейной генерации перекисных соединений связывается с макроскопическим квантовым поведением системы, что позволяет учитывать при дальнейших исследованиях по разработке экспресс-контроля урана в природных водах.

**ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЬ. ГЕНЕРАЦИЯ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА; СВЯЗАННАЯ ВОДА. СОЕДИНЕНИЯ УРАНА. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ.**



## Деркач В. Н. АНИЗОТРОПИЯ ПРОЧНОСТИ НА РАСТЯЖЕНИЕ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ПРИ РАСКАЛЫВАНИИ.

Приведены результаты экспериментальных исследований прочности каменной кладки на растяжение при раскалывании под углами 0, 45, 90 к горизонтальным растворным швам. Получены экспериментальные зависимости прочности каменной кладки на растяжение от угла наклона сжимающего усилия к горизонтальным растворным швам для различных значений прочности кладочного раствора и типа кладочных элементов.

**КАМЕННАЯ КЛАДКА. РАСКАЛЫВАНИЕ. ПРОЧНОСТЬ НА РАСТЯЖЕНИЕ. АНИЗОТРОПИЯ ПРОЧНОСТИ.**

## Киселёв В. Г. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛОВ ПОДЗЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ.

В статье рассмотрены основные методы измерения потенциалов подземных металлических сооружений, используемые в технике защиты от коррозии, и отмечены тенденции их развития. Повышенное внимание уделено оценке достоверности измерений, прежде всего с использованием метода отключения.

**МЕТОД ОТКЛЮЧЕНИЯ. МЕТОД МОДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА. КАТОДНАЯ ЗАЩИТА. ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛОВ.**

## Харламов М. В. ИНТЕРАКТИВНАЯ ПОДСВЕТКА КАК ИНСТРУМЕНТ КОММУНИКАЦИИ В АРХИТЕКТУРЕ.

В статье рассматриваются современные тенденции архитектурного освещения, которые предусматривают использование интерактивного режима подсветки. Разбираются основные схемы, функции, определяющие коммуникативные свойства подобных технологий. Это обуславливает их применение в практике проектирования архитектуры.

**АРХИТЕКТУРНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ. ИНТЕРАКТИВНЫЙ РЕЖИМ ПОДСВЕТКИ. СХЕМЫ. ФУНКЦИИ. ВКЛЮЧЕНИЕ В СТРУКТУРУ ЗДАНИЯ.**

## Петриченко М. Р., Петриченко М. В. ДОСТАТОЧНЫЕ УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ЩЕЛЕВОМ КАНАЛЕ.

Выведены условие существования свободноконвективного течения (СКТ) в вертикальной щели с несимметричным нагревом и условие максимального расхода. Эти условия связаны с показателем политропы в СКТ.

**СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ. ЕСТЕСТВЕННАЯ ТЯГА. ТЕЧЕНИЕ ВОЗДУХА В ВЕРТИКАЛЬНЫХ КАНАЛАХ. ТЕПЛОПЕРЕНОС. АДИАБАТНОЕ РАВНОВЕСИЕ.**

## Мишиakov В. А., Синяков Л. Н., Соколов В. А., Страхов Д. А. ИНЖЕНЕРНО-ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ТЭЦ.

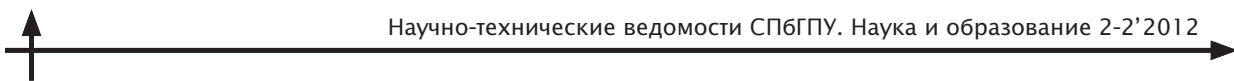
Изложены особенности и результаты технического обследования строительных конструкций здания спецводоочистки Северо-Западной ТЭЦ в Санкт-Петербурге. На общую фундаментную плиту опираются ограждающие кирпичные стены здания и железобетонные колонны, на которые передают нагрузку расположенные в здании стальные резервуары. При обследовании установлены причины образования и развития трещин в кирпичной кладке стен. Главными причинами признаны осадки фундаментной плиты при неодинаковом наполнении резервуаров. Результаты инструментальных исследований и натурного эксперимента подтверждены расчетами. Предложены и реализованы мероприятия по усилению конструкций, после реализации которых развитие трещин прекратилось.

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ. ФУНДАМЕНТНАЯ ПЛИТА. ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОЛОННЫ. СТАЛЬНЫЕ РЕЗЕРВУАРЫ. КИРПИЧНАЯ КЛАДКА. ТРЕЩИНЫ. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ. ПОВЕРОЧНЫЕ РАСЧЕТЫ.**

## Шевелёв А. Н. ПРОБЛЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БАЗОВОГО И ПОСТДИПЛОМНОГО ПЕДАГОГИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ: ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ.

В статье представлен анализ общего состояния и проблем современного постдипломного педагогического образования в зарубежных странах. Контекстом выступает состояние базового педагогического образования, профессиональный и социальный статус школьного педагога, исторический генезис традиций педагогического образования. Делаются выводы о сравнительных тенденциях развития отечественного и зарубежного постдипломного педагогического образования. Статья может быть полезна преподавателям системы постдипломного образования, аспирантам и докторантам, специализирующимся на проблемах профессионального образования, педагогам — слушателям системы повышения квалификации, управленцам — разработчикам стратегии модернизации и реформирования системы педагогического образования.

**ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ. ПОСТДИПЛОМНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ. ПОВЫШЕНИЕ КВАЛИФИКАЦИИ ПЕДАГОГОВ. ТРАДИЦИИ ПЕДАГОГИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ.**



Демидов А. И. К ИСТОРИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В РОССИИ: ВИЛЛИМ ИВАНОВИЧ ГЕННИН (1676–1750).

Жизнеописание одного из организаторов горно-металлургической промышленности России с первой половины XVIII века.

ОГРАНИЗАТОР. ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ. ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ.

Похолков Ю. П., Рожкова С. В., Толкачёва К. К. СОВРЕМЕННОЕ ИНЖЕНЕРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ КАК ОСНОВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ РОССИИ.

В статье представлены результаты исследования состояния инженерного дела и инженерного образования в России. Предложены пути совершенствования инженерного образования как основной составляющей технологической модернизации России на примере подготовки компетентных инженеров. Рассмотрены требования, предъявляемые к системе оценки качества компетентности специалистов в области техники и технологии.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ. ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО. ИНЖЕНЕРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ. КОМПЕТЕНЦИЯ. КОМПЕТЕНТНОСТЬ. СИСТЕМА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА.

## ABSTRACTS

### KEYWORDS

**Zheleznyakov A. B., Korablev V. V. EXPERIENCE OF SPACE EXPLORATION BY THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA.**

Various aspects of space activities of the People's Republic of China are considered in the article. They include brief history of rocket technology development, analysis of space branch's current state and perspectives of space exploration by Chinese scientists and experts.

PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. COSMONAUTICS. ROCKET. SATELLITE. MOON.

**Blagoveshchensky A. Y. SOME MILESTONES OF CREATION AND DEVELOPMENT OF NUCLEAR ENERGY Ship (recollections, impressions, reflections).**

In this article discusses some of the key moments of creation and rapid development of domestic naval nuclear power in the recent past against the backdrop of the current situation in this area/

ATOMIC SUBMARINE. REACTOR. EMERGENCY COOLING. NATURAL CIRCULATION. TEPLONASITELYA. RELIABILITY. SAFETY. SURVIVABILITY.

**Kiselev V. G. THERMODYNAMIC AND KINETIC TREATMENT OF THE POTENTIAL OF SINKING/**

In the article the thermodynamic and kinetic treatment of appearance and constancy of the potential of sinking is examined. Dana is the evaluation of the influence of the potential of sinking on the rate of corrosive processes. The increased attention is given to the influence of the capacity of dual electrical layer on the rate of corrosion on the water line in the zone of drops of power machinery equipment.

CORROSION ON THE WATER LINE. THE POTENTIAL OF SINKING. THE POTENTIAL BILLITER. ELECTROCHEMICAL CORROSION. CORROSION IN THE ZONE OF DROPS.

**Leontyev R. A., Rassokhin V. A. THE BASIC WAYS OF PROFITABILITY IMPROVEMENT OF GAS AND AIR INSTALLATIONS.**

In clause ways of profitability improvement of gas and steam installations are considered. Problems with reference to modern gas and steam units are stated.

GAS STEAM UNITS. GAS TURBINE UNITS. STEAM TURBINE. COMBINED UNITS.

**Kurilenko N. I., Maksimov V. I., Mamontov G. Y., Nagornova T. A. MATHEMATICAL MODELING OF CONJUGATE HEAT TRANSFER IN SYSTEM WITH RADIATION HEAT SOURCE.**

The results of mathematical modeling of conjugate heat transfer in a closed rectangular region with a radiation-heating local source are presented. The regimes of free convection in the region limited by the solid walls are investigated. Two-dimensional nonstationary problem is solved within the framework Navier-Stokes model for gas and thermal conductivity for solid walls. Is carried out the analysis of heat propagation dynamics in the closed domain with the course of time.

CONJUGATE HEAT TRANSFER, RADIATION HEAT SOURCE, NUMERICAL MODELING, NATURAL CONVECTION.

**Zelenin A. S., Kuznetsov V. L., Popov M. G., DEVELOPMENT OF MICROPROCESSOR-BASED PROBATORY-DIAGNOSTIC COMPLEX FOR POWER SYSTEM RELAY PROTECTION AND AUTOMATION FACILITIES**

In the article the practical solutions for the issues of probatory complex implementation are considered. General description of the main elements of the complex software under development is given.

SIMULATION. IMPLEMENTATION. PRACTICAL SOLUTIONS. PROBATORY COMPLEX. TESTING/

**Nozdrin G. A., Abakshin A. Yu., Kukolev M. I. THE ACCOUNTING OF ADDITIONAL VOLUMES IN CALCULATIONS OF A CYCLE OF SCHMIDT/**

The article presents the materials for discussion of the improved variant of Schmidt's cycle for Stirling engine calculation.

STIRLING ENGINES. EXTERNAL COMBUSTION ENGINES. PISTON ENGINES. SHMIDT'S CYCLE. SIMULATION.



### Sysoev A. V., Smolovik S. V. THE ALGORITHM OF ARRANGEMENT REACTIVE POWER SOURCES IN COMPLEX POWER SYSTEM/

In the article the algorithm of optimization reactive current in lines of power system is described. The main idea of algorithm is enumeration of possibilities installation reactive power sources. Among all variants only one variant in which losses of power has minimum value is chosen. As example, the described algorithm is checked on power system.

ELECTRICAL POWER SYSTEM. COMPENSATION OF REACTIVE POWER. LOSSES OF ACTIVE POWER. REACTIVE POWER SOURCE.

### Mikheyev P. Yu., Tananayev A. V. METHODS EXERGIC LIFE CYCLE ANALYSIS OF ENERGY OBJECTS.

Issues of efficiency of the energy objects (power plants) have been examined. Methodology of exergetic analysis of the energy objects' life cycles has been developed. In the frame of the methodology the concept of life cycle has been defined and dependences for definition of exergy's cost and electricity generated during the life cycle of the energy of an object have been given and substantiated, as well as measure of efficiency has been formulated. By using this methodology definition, comparison and analysis of energy efficiency of various energy facilities could be quickly produced.

EXERGY. LIFE CYCLE. ENERGY OBJECTS. ENERGY EFFICIENCY. COSTS EXERGY. ELECTRICITY.

### Grachev A. A., Sokolov S. A. Effect of flatness ELEMENTS OF PERFORMANCE LIFTING THIN-WALL STRUCTURES.

Influence of an initial curvature on ruggedness of plates as separately, and in structure is considered. Recommendations are made according to operating pressure in not flat plates at action of longitudinal forces.

PLATE. RIGIDITY. CURVATURE. PRESSURE. NOT FLATNESS

### Makarov Yu. V. CALCULATION OF THE NUMBER OF WORKERS AT THE SITE OF GRAIN DIAMOND GRINDING WHEEL CONTACT WITH THE SURFACE OF THE WORKPIECE.

The paper proposed and tested method of calculating the number of grains on the working area of the grinding wheel contact with the workpiece. The proposed model allows to evaluate the effectiveness of diamond grinding wheels.

METHODS. MODEL. GRINDING. GRAIN. DEPTH OF CUT. CONTACT AREA. GRAIN DENSITY.

### Pelevin N. A., Piskarev P. Ju, Prokopenko V. A. INVESTIGATION AND ANALYSIS OF POSSIBILITIES OF VARIOUS CONTROL SYSTEMS FOR SPINDLE HYDROSTATIC BEARINGS OF THE HEAVY MACHINE TOOLS.

In a paper questions of perfecting and heightening technical and plant-performance figures of head slides of cutting machines are considered. Results of static and dynamic probes of possibilities of various control systems and the recommendation for choice circuits of control are presented by hydrostatic bearings.

THE HYDROSTATIC BEARING. THE MANAGEMENT SCHEME. THE STOCK ON THE PHASE. TRANSIENT. КОЛЛЕБАТЕЛЬНОСТЬ. DYNAMIC QUALITY. CORRECTION.

### Folomin A. I., Murashkin S. L. USING FEATURES OF FACE MILLS WITH FIBROUS CONCRETE CASES

The basic mechanical characteristics of fibrous concrete, used for manufacturing cases of face mills are determined. It is shown, that strength of cases of face mills from fibrous concrete can come nearer to characteristics of cases from pig-iron. The features of using mills with concrete cases are determined.

FIBROUS CONCRETE. FACE MILLS. DAMPING/

### Zuev A. V., Yun V. K., Fafinov M. A. DESIGN DRY GAS SEALS TAKING INTO ACCOUNT FEATURES OF THEIR OPERATION IN CENTRIFUGAL CHARGERS NATURAL GAS/

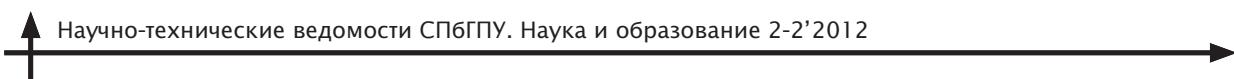
The article deals with methods for calculating the dry gas seals used in centrifugal compressors natural gas. The basic theoretical analysis of gas-dynamic forces generated in the friction pairs

DGS. Spacing Effect. RELEASE. CENTRIFUGAL CHARGER/

### Novikov V. I., Murashkin S. L., Folomin A. I. POLISHING ALLOYED STEELS IN NON-TOXIC ELECTROLYTE AT HIGH VOLTAGE.

We made a comparison of methods that can be used for polishing the blade. Built volumetric stress-strain state model of working part blade after polising. The article shows a simulation model of temperature distribution in the work area and gives treatment regimes electrolytic-plasma polishing 30 HGSA steel blades.

ELECTROLYTIC-PLASMA. POLISHING. BLADE. SIMULATION MODEL.



**Ivanov A. V., Vaganov V. V., Kotov K. A. PREDESIGN OF THE SCHEME OF MANAGEMENT BY FLOWS OF ORDERS ON PRINTING PRODUCTION.**

The comprehensive approach to optimum use of delivery capacity of the polygraphic equipment is presented. At the heart of the new approach the solution of three interdependent optimization commitments lays.

PRODUCTION. PROCESS. INTERVAL. MATRIX. TASK. INFORMATION. CRITERION. SCHEME. INTERVAL. CHARACTERISTIC. RESURSOYEMKOST.

**Romanov P. I., Viktorenko S. V. DEVELOPMENT of BALANCED MANIPULATOR FOR REPAIR FOREST MACHINES.**

The researching results of development of pneumatic balanced manipulators for mechanization repair of forest machines out of stationary repair objects are described in the paper.

BALANCED MANIPULATOR. REPAIR. FORESTRY MACHINES. PNEUMATIC SYSTEM.

**Nikitkov N. V., Makar Yu. V. MATHEMATICAL MODEL OF CUTTING ABILITY OF DIAMOND CIRCLES AT GRINDING PREPARATIONS FROM FIRM FRAGILE MATERIALS.**

In clause questions of analytical calculation of modes of grinding are considered by diamond circles of fragile preparations. Dependences for calculation of modes of grinding of firm fragile materials are offered.

MODES. DENSITY OF GRAINS. DIAMOND CIRCLES. CALCULATION OF MODES OF PROCESSING.

**Rusinov R. V., Dobretsov R. Yu. THERMAL EFFICIENCY OF THE ADIABATIC TWIN-CHARGED INTERNAL COMBUSTION ENGINE CYCLE.**

This report examines thermal cycle efficiency of the diesel engine with heat-insulated combustion chambers. Suggested methodology for calculation, based on parameters of the thermal cycle, that afford to evaluate fuel consumption, efficiency factor, engine power output and other characteristics.

DIESEL ENGINE. RUNNING CYCLE. PROFITABILITY.

**Razumov N. G., Popovich A. A., Silin A. O. DEVELOPMENT CRYOGENIC HIGH NITROGEN AUSTENITIC POWDER STEEL WITH NANOCRYSTALLINE STRUCTURE.**

Shows the results of research of phase formation in obtaining high-nitrogen powder of Fe-Cr-Ni-Mn-N by mechanochemical synthesis. Results of researches the fine crystalline structure in the high-resolution transmission electron microscope Technai S-Twin G230. Shows a typical nanocrystalline structure of high-alloy powder of Fe-18Cr-8Ni-12Mn-0.9N obtained by mechanochemical synthesis.

AMMONIA. ATMOSPHERE. ALLOY. AUSTENITE. MECHANOSYNTHESIS.

**Glazkov A. V. TECHNOLOGY FOR COLD BENDING PIPE LONGITUDINAL METHOD OF ROLLING.**

The article deals with the known methods of flexible pipes and problems. The new technology of cold bending, allowing us to obtain new technical features high-quality tube bending.

COLD BENDING. LONGITUDINAL ROLLING. BALL DORN. ZONE PLASTIC HINGE.

**Kotov S. A., Markov V. A., Markov A. N., Maltsev A. A. RESEARCH OF WEAR RESISTANCE OF THE COMPOSITE COVERING «ПК40Х2» PUT WITH A METHOD OF AN ELECTROCONTACT PRIPEKANIYE.**

This work is devoted to research of intensity of wear process of the composite covering baked by an electrocontact method. The choice suitable a material is made and the technique of carrying out researches is described. Result of the done work is dependence of intensity of wear process on factors of technological process of drawing of a covering. It is established that when using composite coverings wear resistance of details raises for 64 %.

INTENSITY OF WEAR PROCESS. COMPOSITE MATERIALS. ELECTROCONTACT PRIPEKANIYE. ABRASIVE WEAR PROCESS. FACTORS OF TECHNOLOGICAL PROCESS.

**Volkova E. N., Demidov A. I. RECEIVING OF THE X-RAY PURE MONOCRYSTAL NICKEL SULFATE HEXAHYDRATE.**

During hydrometallurgical processing of the oxygen-nickel electrode active materials of the fulfilled alkaline Ni-MH batteries by crystallization from a solution containing a sulfuric acid, monocrystal nickel sulfate hexahydrate (retgersite) are received. The theoretical substantiation of an opportunity of reception X-ray pure crystal nickel sulfate is resulted.

HYDROMETALLURGY. HEXAHYDRATE SULFATE OF NICKEL. RETGERSITE. NICKEL SULFATE. ALKALINE NI-MH BATTERIES. X-RAY PURE. MONOCRYSTALS.



**Karasev M. V., Rabotinskiy D. N., Cherkasova L. G., Pavlov K. A., Belyaev A. E., Steschenko N. A. PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF POWER SUPPLIES OF ARC WELDING FOR DOMESTIC SHIPBUILDING.**

The classification of welding equipment for arc welding in shipbuilding from 6 groups has been developed in this article. Future directions of production development of shipbuilding welding equipment are determined on the base of this classification. The article can be interested for the technologists of shipyards for proper choosing of welding equipment for MIG/MAG welding.

CLASSIFICATION. WELDING EQUIPMENT. ARC WELDING. SHIPBUILDING.

**Latyshev D. V., Mityukov A. A., Petrov M. Yu., Popov V. A. VISCOPLASTIC PROPERTIES OF CHROMIUM-NICKEL STEEL WITH THE EVER GROWING AND A CONSTANT LOAD. PART 1.**

Results of experimental studying of short-term creep of hromonikelevy steel are given at normal (room) temperature. Tests of thin-walled tubular samples were carried out in the conditions of a constant and in steps increasing loadings. When processing results it was used the main hypothesis of an uprogovyazkoplastichesky body according to which complete not elastic deformation is represented the sum elastic, plastic and vyazkoplastichesky a component.

It is established that charts «vyazkoplastichesky deformation – intensity of nonequilibrium tension» depend on a type of a tension. Vyazkoplastichesky deformation at high level of complete not elastic deformation is comparable to instant plastic deformation therefore it should be taken into consideration at some types of processing of metals by pressure.

UPRUGOVYAZKOPLASTICHESKY MATERIAL; VISCOSITY; INTENSITY OF TENSION AND DEFORMATIONS; INSTANT LOADING; LOADING WITH ENDURANCE OF TIME. THE DEFORMATION CHART; VYAZKOPLASTICHESKY DEFORMATION.

**Bashenkov V. V., Okh apkin K. A. THEORETICAL ANALYSIS OF HEAT TRANSFER PROCESSES DURING SPOT STIR WELDING.**

In article recommendations for choosing of spot stir welding conditions which guarantee saving of metal properties at high level are given. Experimental research of welding thermal cycles influence on structure and properties of metal was carried out.

SPOT STIR WELDING. WELDING CONDITIONS. MICROHARDNESS. INTERMETALLIC PHASES.

**Abakshin A. Yu., Nozdrin G. A., Kukolev M. I. NUMERICAL SIMULATION OF HEAT AND MASS TRANSFER IN CYLINDERS OF EXTERNAL HEAT SUPPLY.**

The article presents the materials about methods and results of numerical experiment, intended for studying processes, that take place inside the external combustion engine during its operation.

STIRLING ENGINES. EXTERNAL COMBUSTION ENGINES. PISTON ENGINES. NUMERICAL SIMULATION.

**Chemekov V. V. DEVELOPMENT THE MATHEMATICAL MODEL OF AUTONOMOUS HEATING SYSTEM BASED ON HEAT PUMP.**

In this article is considered methods of constructing a mathematical model of autonomous heating system based on heat pump. The method is founded on equations which describing the features of generation, conversion and storage of heat and electricity energy.

AUTONOMOUS HEATING SYSTEM. RENEWABLE ENERGY SOURCES. MATHEMATICAL MODEL. OPTIMIZATION.

**Antoshenko T. V., Borodkin A. V., Mamutov V. S. COMPUTER SIMULATION OF COMBINING OF STATIC LOADING AND IMPULSE LOADING UNDER FORMING OF SHEET METAL BY MOBILE MEDIUM.**

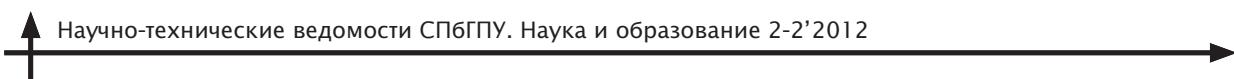
The task of computer simulation of combining of static loading and impulse loading under forming of sheet metal by mobile medium with using LS-DYNA was resolved. The computational procedure is used for calculation of parameters of process of stamping of a part "diaphragm" from thin sheet an aluminum alloy. Results of computer calculations together with formability diagram have allowed defining of the combined loading parameters for stamping the part without destruction of sheet metal.

SHEET METAL FORMING. MOBILE MEDIUM. STATIC LOADING. IMPULSE LOADING. COMBINING. COMPUTER SIMULATION USING LS-DYNA. PART "DIAPHRAGM". FORMABILITY DIAGRAM. COMBINED LOADING PARAMETERS.

**Tolmachov V. V., Bogov I. A., Vokhmyanin S. M. CALCULATION METHODS OF A DRAWING VORTEX GLOW-STABILIZING MODULE TURBINES.**

Design calculation algorithm of the flame-stabilizing igniter modulus in the firing systems of turbines represented in the article (submitted paper). Block diagrams of structural modular heat calculations performed on the personal computer.

ALGORITHM. DESIGN CULCULATION. FLAME-STABILIZING IGNITER. FIRING SYSTEMS. BLOCK DIAGRAM. COMBUSTION CHAMBER. TURBINE-INSTALATION.



## Ivanov A. V., Vaganov V.V., Kotov K.A. ORGANIZE BY MULTIPLE CRITERIA ORDERS THROUGH PREFERENCES NEURONET SORTING SOLUTION.

The condition of security of an optimality of a production cycle of separate orders on polygraphic manufacture leads to necessity of the solution of «a ranging problem» with conservation of sequence of machining of orders. The general sequence of offered procedure of ordering of orders is presented by four stages.

CRITERIA. RANGING. TASK. MATRIX. PRODUCTION. LINE. CONTINUITY OF PROCESSES. INTERVAL. ALGORITHM.

## Eistratov V. V., Minina A. A. MODELING OF ENERGY-EFFICIENT PART OF THE WIND FLOW OVER SHORT TIME INTERVALS.

This work addressed the issue of finding a mathematical model of the wind, taking inside tie of experimentally obtained values of wind speed and applicable it to predict the short-term periods.

MODEL OF WIND. SHORT-TERM. INTRASEQUENCE. DISTRIBUTION LAW. PREDICTION. SPECIFIC CAPACITY.

## Popov A. N., Polishchuk M. N. THE FIRE ESCAPE CHUTES EFFICIENCY ANALYTICAL ESTIMATION WHILE LIQUIDATION OF EMERGENCY SITUATIONS.

The problems of increasing the efficiency of using the fire escape chutes while liquidation of emergency situations are considered in the article. Analytical models are considered and the estimations of the basic characteristics of process of evacuation by means of saving sleeves are received.

EMERGENCY SITUATION. BAG SAVING DEVICE. ANALYTICAL MODELLING. THEORY OF MASS SERVICE.

## Gvozdakov D. V., Gubin V. E., Kuznetsov G. V. NUMERICAL ASSESSMENT OF FORMATION OF CONDITIONS OF ATMOSPHERIC FORMATION OF SULFURIC ACID AROUND THE ARRANGEMENT OF THERMAL POWER PLANT.

Results of a numerical assessment of conditions of formation of sulfuric acid in the air space adjacent to thermal power plant are presented. Territory borders over which formation of an acid precipitation in various seasons is possible are defined. The range of possible change of absolute concentration of sulfuric acid in the field of education of a precipitation is established.

MATHEMATICAL MODELLING. HEAT EXCHANGE. THE MIXED CONVECTION. THERMAL POWER PLANT. POLLUTION. SMOKE GASES. SULFURIC ACID.

## Krutolapov A. S. THE TECHNIQUE OF DETECTION AND CORRECTION OF INTERRUPTIONS OUT OF THE PROTOCOL IN NETWORKS OF DATA TRANSMISSION OF DIVISIONS OF GOVERNMENT FIRE SERVICE MINISTRY OF EMERGENCY SITUATIONS OF RUSSIA.

The technique of detection and correction of interruptions out of the protocol in networks of data transmission of GPS Ministry of Emergency Situations of Russia is considered. The technique assumes four main stages: definition of the specification of the protocol corresponding to a normal mode of operation; formation and check of an admissibility of the incorporated conditions; formation of procedure of fixing of time of a logic way; restoration of processes of information exchange. Each of stages assumes development of the corresponding software.

NETWORK. THE DATA TRANSMISSION. THE AUTOMATED SYSTEM OF DISPATCHING MANAGEMENT. STRUCTURE. THE PROTOCOL. INTERRUPTION OUT OF THE PROTOCOL. FAILURE. THE RESTORATION MECHANISM FROM MISTAKES. THE SOFTWARE.

## Rozov A. L., Rousina N. Yu., Atoyan G. L. ABOUT DESTRUCTION OF CONCRETE DAMS ON THE SOFT BASIS.

The article covers physical and mathematical model of the process of breaching of concrete dams on a soft base by bottom currents. The model is represented by a system of ordinary differential equations of the first order.

The numerical algorithm is developed for solving the system, presuming the special conditions are imposed for integration of the equations in case of washout of sections of a multisection dam. The solution is obtained through explicit single-step integration scheme (Runge-Kutta-Fehlberg method) — both for single-section and multisection dams. The integration scheme is modified taking into consideration the special conditions formulated to be imposed on the sections. The graphs are constructed for the following functions: breach development and water storage level.

The worked out approach allows to solve a number of problems oriented on erosion of dams on a soft base, consisting of many sections. The model is burning for damage estimates from the consequence of the dam-break wave, the estimates necessary for undertaking protection measures from emergency situations connected with catastrophic breakdowns of dams, and for minimizing the damage from breakdowns as well.

CONCRETE DAM. SOFT BASE. BREACH. DAM-BREAK WAVE. DAM FAILURE. WASHOUT. MODEL. EMERGENCY SITUATION.



## Gumenyuk V. I., Fedosovskiy M. E., Syrov A. A., Atoyan G. L. PRINCIPLES AND METHODS OF IMPROVING PROTECTABILITY OF CONTROL SYSTEMS OF CRITICAL FACILITIES.

The paper addresses principles and methods of protection design of control systems (CS) of critical facilities (CF) from damage factors of technogenic accidents and catastrophes. It is necessary to note that when assessing the protectability level of CF control systems one should take into consideration mechanical, thermal, electromagnetic, radiation and other effects.

The basic kinds of vulnerabilities of CS are identified. These include: objective, subjective and stochastic vulnerabilities. The paper presents an algorithm for protection design of a control system based on threat and vulnerability analysis, the main directions of vulnerability reduction for control systems are discussed. The protection schemes based on classical concept of in-depth defense for protecting CF control systems are introduced.

CRITICAL FACILITIES. CONTROL SYSTEM. DAMAGE EFFECTS. PROTECTION OF CONTROL SYSTEMS. THREAT AND VULNERABILITY ANALYSIS. PROTECTABILITY. VULNERABILITY REDUCTION.

## Krutolapov A. S., Sychev D. A. PROCESSES OF INFORMATION EXCHANGE IN DATA TRANSMISSION NETWORKS ON THE BASIS OF FIELD TYRES.

The mathematical model of processes of information exchange which is based on mathematical apparatus of multithreaded systems of mass service of the difficult structure, differing by use of the closed networks of Markov for the description of a traffic of messages and allowing to optimize network resource management is constructed.

NETWORK OF DATA TRANSMISSION. SYSTEM OF MASS SERVICE. MULTITHREADED NETWORK. CHANNEL. FIELD TYRES. FLOW OF INFORMATION. POISSON STREAM. CAPACITY. TRAFFIC. AVERAGE DELAY OF MESSAGES. NETWORK TOPOLOGY.

## Maslikov V. I., Chusov A. N., Negulyaeva E. Yu., Cheremisin A. V., Molodtsov D. V. LABORATORY RESEARCH OF WASTE DECOMPOSING IN BIOREACTORS FOR ASSESSMENT OF BIOGAS POTENTIAL AND CHOICE OF MEASURES FOR AFTERCARE PHASE.

There is substantiated in the article suitability of carrying out experiments on research of waste decomposition processes on model samples in bioreactors. To assess in situ condition and impact of municipal solid waste (MSW) landfills on environment it is necessary carrying out long-term laborious full-scale observations. Thus more attention should be paid to calculation methods of assessment using laboratory research results obtained in bioreactors. There are simulated with high reliability conditions of going on biochemical processes in landfill body. It gives an opportunity to choose needed mathematical models and to correct their parameters. Using the specified methods allows in a short time to obtain necessary information on waste decomposition processes in landfills, to assess biogas potential, degree of their mineralization at various stages of biochemical processes and to choose measures for aftercare phase.

MUNICIPAL SOLID WASTE. BIOREACTORS. GAS AND WATER EMISSIONS. BIOGAS POTENTIAL. MINERALIZATION. LANDFILLS. MEASURES FOR AFTERCARE PHASE.

## Arefyev K. M., Arefyev V. K., Fedorovich E. D., Sharqawy M. H. HEATMASSTRANSFER IN SEA WATER DESALINATION SYSTEMS WITH SOLAR HEATER.

There are analyzed the heatmasstransfer processes, performing in equipment of one of possible sea water desalination systems, acting with solar heating source usage. The circulation in system air is humidified by the sea water, then it is heated in solar heater and enters in a dehumidizator — condenser, which is cooled by sea water in flow. A desalinated condensate is directed to fresh water consumer. There is considered in detail a process of condensation of system from moistened steam — air mixture in a heat exchanger — dehumidizator of plate type.

SEA WATER DESALINATION. HEATMASSTRANSFER. PLATE TYPE HEAT EXCHANGER — CONDENSER. CONVECTIVE HEAT TRANSFER TO WATER. RELATIVE HUMIDITY. CONDENSATION FROM STEAM-AIR MIXTURE.

## Usmanova R. R. DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC BASES OF RATIONAL DESIGN OF DEVICES OF GAS CLEANING.

On the basis of experimental researches influence of the basic constructive and regime parameters on efficiency and hydraulic resistance of the vortical device is analysed. The method of the calculation is developed, allowing to establish optimum separation characteristics of devices of vortical type. Criterion of optimization the minimal cost of gas purification serves at peak efficiency of separation.

METHOD OF CALCULATION. EFFICIENCY OF GAS PURIFICATION. HYDRAULIC RESISTANCE. THE DESIGN. COST OF GAS CLEANING. THE VORTICAL DEVICE.



**Popovich A. A., Van Cin Shen RESEARCH OF STRUCTURE AND PROPERTIES ANODE MATERIALS FOR LITHIUM-ION POLYMER BATTERIES RECEIVED FROM PLANT RAW MATERIALS.**

On the experimental unit obtained and modified anode matrix for lithium-ion (polymer) batteries from plant raw materials: shoots of bamboo and sugarcane. Using modern methods of electron scanning microscopy and X-ray analysis identified structural features of the obtained anode matrix. Show results of researches the specific surface of powder, the surface structure of particles, as well as measurements of the maximum permissible and optimal indicators of the anode material.

ANODE. LITHIUM-ION BATTERY. PLANT RAW MATERIAL. BAMBOO. SUGARCANE.

**Kulinkovich A. B. FORMATION OF ACTIVE FORMS OF OXYGEN IN WATER SOLUTIONS OF SALTS OF URANIUM AT INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC FIELDS.**

Complexity of express control of compounds of uranium in natural waters is shown. Influence of electromagnetic fields on generation of active forms of oxygen in water solutions of compounds of uranium is investigated. Observable character of nonlinear generation peroxide compounds contacts macroscopical quantum behavior of system that will allow to consider at the further researches on working out of express control of uranium in natural waters.

CHEMILUMINESCENT EXPRESS-CONTROL, GENERATION OF ACTIVE FORMS OF OXYGEN, CONNECTED WATER, COMPOUNDS OF URANIUM, ELECTROMAGNETIC FIELDS OF LOW INTENSITY.

**Derkach V. N. ANISOTROPY OF THE TENSILE STRENGTH OF THE MASONRY IN SPLITTING.**

The results of experimental researches of the tensile strength of masonry in splitting at angles of 0, 45, 90° to the horizontal mortar joints have been presented. The experimental dependences of the tensile strength of masonry on the angle of the compressive force to the horizontal mortar joints for different values of the strength of masonry mortar and different types of masonry elements have been obtained.

MASONRY. SPLITTING. TENSILE STRENGTH. THE ANISOTROPY OF STRENGTH.

**Kiselev V. G. CONTEMPORARY TENDENCIES OF THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF POTENTIAL MEASUREMENT OF UNDERGROUND METALLIC CONSTRUCTION.**

In the article are examined the basic methods of potential measurement of underground metallic construction, the corrosion protections utilized in the technology, and the trends of their development are noted. The increased attention is given to the estimation of the authenticity of measurements, first of all with the use of a method of turning off.

METHOD OF TURNING OFF. THE METHOD OF MODEL ELECTRODE. ELECTROCHEMICAL PROTECTION. CATHODE PROTECTION. POTENTIAL MEASUREMENT.

**Kharlamov M. V. INTERACTIVE LIGHTING AS A COMMUNICATION TOOL IN ARCHITECTURE.**

The article addresses the modern trends of architectural lighting that include use of interactive mode of highlighting. There is review of main schemes, functions, basic communicative features of these sort of techniques. This determines their application in the practical field of architectural design.

ARCHITECTURAL LIGHTING. INTERACTIVE MODE OF HIGHLIGHTING. INCLUSION IN THE BUILDING STRUCTURE.

**Petrichenko M. R., Petrochenko M. V. SUFFICIENT CONDITIONS FOR EXISTENCE OF FREE CONVECTION FLOW IN VERTICAL NARROW CHANNELS.**

It is proved that the existence of free convection flow (FCF) in a vertical slit with asymmetric heating is sufficient to satisfy the condition:  $0 < n < n_{ex}$ , where  $n_{ex}$  — the polytropic index in the FCF,  $n_{ex}$  — polytropic index corresponding to the equilibrium state of the gas column. In particular, if the equilibrium state corresponds to the condition of no supply of heat, then:  $0 < n < k$ ,  $k$  — ratio of specific heats. For the existence of the gap in the maximum mass flow rate

it is necessary that:  $n = \frac{gL}{RT_0}$ , where  $L$  — the height of the slit,  $T_0$  — temperature at ground level. Polytropic index  $n$  is

related to the intensity of heat transfer from hot wall to the flow: with increasing intensity of heat transfer  $n \rightarrow +0$ .

FREE-CONVECTIVE FLOW. NATURAL DRAFT. AIR FLOW IN VERTICAL CHANNELS. HEAT TRANSFER. ADIABATIC EQUILIBRIUM.

**Mishakov V. A., Sinyakov L. N., Sokolov V. A., Strakhov D. A. ENGINEERING-DIAGNOSTIC INSPECTION OF BUILD OBJECTS OF NORTH-WESTERN TEC.**

The features and results technical inspection structures of waste water treatment building of North-West TEC in St.-Petersburg are described. Non-load-bearing brick walls and reinforce-concrete columns lean on concrete foundation slab. The reasons of crack origin and development in brickwork are exposed. The main reason is uneven deformations



of foundation slab at the different filling of reservoirs. The results of instrumental researches and model experiment are confirmed by calculations. Offered and realised measures of constructions strengthening, after that cracks development was halted.

BUILDING DESIGNS. TECHNICAL INSPECTION. FOUNDATION SLAB. CONCRETE COLUMNS. STEEL TANKS. BRICKLAYING. CRACKS. TOOL RESEARCHES. NATURAL EXPERIMENT. TESTING CALCULATIONS.

#### Shevlev A. N. PROBLEMS OF INTERACTION BASE AND POSTGRADUATE PEDAGOGICAL EDUCATION: FOREIGN EXPERIENCE.

In article the analysis of the general condition and problems of modern post-degree pedagogical education in foreign countries is presented. As a context the condition of basic pedagogical education, the professional and social status of the school teacher, historical genesis of traditions of pedagogical education acts. Conclusions about comparative tendencies of development of domestic and foreign post-degree pedagogical education become. Article can be useful to teachers of system of post-degree education, graduate students and the doctoral candidates specializing on problems of professional education, teachers - to listeners of system of professional development, managers - to developers of strategy of modernization and reforming of system of pedagogical education.

PEDAGOGICAL EDUCATION. POST-DEGREE EDUCATION. PROFESSIONAL DEVELOPMENT OF TEACHERS. TRADITIONS OF PEDAGOGICAL EDUCATION.

#### Demidov A. I. TO HISTORY OF PROFESSIONAL EDUCATION IN RUSSIA: VILLIM IVANOVICH GENNIN (1676–1750).

The biography of one of organizers of the mining and metallurgical industry of Russia from the first half of the XVIII century.

ORGANIZER. MINING AND METALLURGICAL INDUSTRY. PROFESSIONAL EDUCATION

#### Pokholkov Yu.P., Rozhkova S.V., Tolkacheva K.K. MODERN ENGINEERING EDUCATION AS A BASIC ELEMENT OF TECHNOLOGICAL MODERNIZATION OF RUSSIA.

The paper presents the results of research on the state of engineering and engineering education in Russia. Authors describe the ways to improve engineering education as a key component of the technological modernization of Russia on the example of training competent engineers. The requirements to the system of quality assessment of competent specialists in the field of engineering and technology are considered in the article.

TECHNOLOGICAL MODERNIZATION. ENGINEERING. ENGINEERING EDUCATION. COMPETENCE. COMPETENCY. QUALITY ASSESSMENT.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ**

**№ 2-2 (147) 2012**

**НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ**

Учредитель – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Издание зарегистрировано в Госкомпечати РФ, свидетельство № 013165 от 23.12.94

Редакция

академик РАН *Ю.С. Васильев* – председатель редакционной коллегии  
д-р ист. наук профессор *Р.В. Дегтярева* – заместитель председателя  
д-р техн. наук профессор *В.Н. Боронин* – заместитель председателя  
канд. техн. наук доцент *Л.В. Спиридоноva* – научный редактор, корректор  
*Н.П. Измайлова* – помощник выпускающего редактора  
*О.А. Матенев* – технический секретарь

Телефон редакции (812) 294-47-72

E-mail:ntv-nauka@spbstu.ru

Компьютерная верстка *Е.А. Типцовой*

---

Подписано в печать 19.07.2012. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 41,50. Тираж 1000. Заказ 252.

---

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.

Издательство Политехнического университета,

член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России.

Адрес университета и издательства: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29.

# УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ

## в журнале «Научно-технические ведомости СПбГПУ» Серия «Наука и образование»

### 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Научно-технические ведомости СПбГПУ» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием. Он зарегистрирован в Госкомпечати РФ (свидетельство № 013165 от 23.12.94) и распространяется по подписке агентства «Роспечать» (индекс 18390).

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих научных рецензируемых журналов и изданий (перечень ВАК) и принимает для печати материалы научных исследований, а также статьи для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук и кандидата наук по следующим основным научным направлениям: ЭКОНОМИКА; УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ; ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА; ФИЗИКА; МАТЕМАТИКА; ЭНЕРГЕТИКА; МАШИНОСТРОЕНИЕ; ТРАНСПОРТ; СТРОИТЕЛЬСТВО; МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ; РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ, ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА; ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ; ПЕДАГОГИКА; ЮРИДИЧЕСКИЕ НАУКИ.

Журнал выпускается в пяти сериях:

1. Физико-математические науки.
2. Экономические науки.
3. Наука и образование.
4. Информатика. Телекоммуникации. Управление.
5. Гуманитарные и общественные науки.

Периодичность выхода серии журнала «Наука и образование» – 4 номера в год.

### 2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

#### 2.1. Оформление материалов

1. Объем статей докторов наук, профессоров, докторантов, соискателей ученой степени доктора наук, как правило, 12–20 страниц формата А-4. Количество рисунков и фотографий не должно превышать 4, таблиц — 3, литературных источников — 15.

2. Объем статей преподавателей, сотрудников, соискателей ученой степени кандидата наук, как правило, — 8–15 страниц формата А-4, объем статей аспирантов — 8 страниц формата А-4. Количество рисунков не должно превышать трех, таблиц — двух, литературных источников — десяти.

3. Авторы должны придерживаться следующей обобщенной структуры статьи: вводная часть (актуальность, существующие проблемы — объем 0,5–1 стр.); основная часть (постановка и описание задачи, изложение и суть основных результатов); заключительная часть (предложения, выводы — объем 0,5–1 стр.); список литературы.

4. Число авторов статьи — не более трех человек.

5. Набор текста осуществляется в редакторе MS Word, формул — в редакторе MS Equation. Таблицы набираются в том же формате, что и основной текст.

Шрифт — TNR, кегль шрифта основного текста — 14, интервал — 1,5. Таблицы большого размера могут быть набраны 12 кеглем. Параметры страницы: поля слева 3 см, сверху, снизу 2,5 см, справа 2 см. Текст размещается без переносов. Абзацный отступ — 1 см.

6. Рисунки, таблицы, фотографии размещаются по тексту статьи.

#### 2.2. Представление материалов

Вместе с материалами статьи в редакцию должны быть обязательно представлены:

- номер УДК в соответствии с классификатором (в заголовке статьи);
- аннотация статьи (2–3 предложения) на русском и английском языках;
- ключевые слова статьи (5–7 слов) на русском и английском языках;
- сведения об авторах: ФИО, место работы, рабочий телефон, должность, ученое звание, ученая степень, контактный телефон, e-mail;
- рекомендация на имя заместителя главного редактора журнала, подписанная научным руководителем автора и/или руководителем структурного подразделения. Рекомендация должна быть ОБЯЗАТЕЛЬНО заверена в отделе кадров;
- рецензия на имя заместителя главного редактора, подписанная специалистом, имеющим ученую степень доктора наук и/или ученое звание профессора. Рецензия должна быть ОБЯЗАТЕЛЬНО заверена в отделе кадров. Рецензент несет ответственность за содержание статьи, достоверность представленных материалов.

При необходимости редколлегия может потребовать представления акта экспертизы.

Все материалы должны быть представлены по электронной почте: e-mail: [ntv-nauka@spbstu.ru](mailto:ntv-nauka@spbstu.ru)

#### 2.3. Рассмотрение материалов

Представленные материалы (п. 2.2) первоначально рассматриваются редакционной коллегией и передаются на рецензирование. После одобрения материалов, согласования различных вопросов с автором (при необходимости) редакционная коллегия сообщает автору решение об опубликовании статьи, в противном случае она направляет автору мотивированный отказ.

При отклонении материалов из-за нарушения требований по оформлению или как не отвечающих тематике журнала материалы не публикуются и не возвращаются.

Редакционная коллегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

Публикация материалов аспирантов осуществляется бесплатно в соответствии с очередностью.

При поступлении в редакцию значительного количества статей их прием в очередной номер может закончиться ДОСРОЧНО.

Более подробную информацию можно получить по телефону/факсу редакции:

(812) 294-47-72 (с 10 до 18 часов, Олег Александрович) или по e-mail: [ntv-nauka@spbstu.ru](mailto:ntv-nauka@spbstu.ru)