

Научно-технические ведомости СПбГПУ

НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

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

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

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

Журнал издается в пяти сериях:

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

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

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.

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

© Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет, 2012



Содержание

Поздравление	9
--------------------	---

К 110-летию открытия СПбГПУ

Дегтярева Р.В. Высший орган управления вузом	11
Лопота В.А. Космонавтика и XXI век	29
Юревич Е. И. Перспективы развития экстремальной робототехники	38

Энергетика и электротехника

Фролов В.Я., Коротков А.В. О повышении точности определения нормативных потерь электроэнергии и структуры фактических потерь	41
Сысоев А.В., Смоловик С.В. Разработка мероприятий по предотвращению развития аварийного режима энергосистемы при отключении межсистемной связи	45
Епифанов А.А., Кириллов А.И., Рассохин В.А. Расчет характеристик лопаточных решеток малорасходных турбин	50
Василенко Г.В., Амосов Н.Т. Диагностика состояния сетевых подогревателей энергоблока Т-180-130 и предложения по снижению их повреждаемости	55
Коровкин Н.В., Калашников В.С., Кирпанев А.В. Цилиндрическое сканирование в задачах электромагнитной совместимости	60
Епифанов А.А., Кириллов А.И., Рассохин В.А. Расчет трехмерного течения в ступенях малорасходных турбин	65
Логинов С.Ю. Снижение взаимовлияния радиальных сил в бесподшипниковой индукторной машине ..	70
Цыганкова Ю.С. Декомпозиционный подход к расчету потерь теплоты в тепловых сетях	75
Устинов Д.А., Коновалов Ю.В., Плотников И.Г. Паспортизация электрических нагрузок нефтегазодобывающих предприятий	81
Тананаев А.В. Течение жидкого металла в бланкете термоядерного реактора	84
Петров Н.В. Исследование локального энерговыделения в воде вблизи свободной поверхности	92
Батухтин А.Г., Сафонов П.Г., Кириллов М.В. Оптимизация предварительного подогрева холодного воздуха перед воздухоподогревателями котлов (на примере Харанорской ГРЭС)	97
Митюгин А.А., Яковлев В.И. Исследование высоковольтных электромагнитных помех в электрической сети при отключении тока короткого замыкания	103
Анисимова Е.Б., Богданов Ю.В. Перспективное инновационное направление использования высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов в плавучих АТЭС	108
Румахеранг В.М., Топаж Г.И., Захаров А.В. Методика расчетного определения кавитационных показателей гидротурбин	112
Рассохин В.А., Забелин Н.А., Матвеев Ю.В., Харисов И.С. Методика проведения экспериментальных исследований ступеней турбоустановок малой мощности на стендах СПбГПУ	119

Машиностроение

Шеломов В.Б., Добрецов Р.Ю. Уточнение модели поворота гусеничной машины	123
Дудник Т.А., Богов И.А. О нормировании расчетов резьбовых соединений на хрупкую прочность	128
Маслов В.И., Арутюнян А.И. Повышение качества производства поршневых колец	132
Дудник Т.А., Богов И.А., Ласкин А.С. Определение допустимых размеров дефектов в заготовках крупных роторных валов	137
Радкевич М.М., Фомин Д.Ю. Физическое моделирование технологического процесса полугорячей штамповки	143
Ушаков А.П. Информативность лазерной вибродиагностики машин и конструкций	147

Металлургия и материаловедение

Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Фукс М.Д., Петров С.Н. Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 45Х26Н3ЗС2Б2 при температурах эксплуатации. Сообщение 1: Литое состояние	155
Попов И.О., Митрофанов Ю.А. Научные и практические основы применения эгиринового концентраты — техногенного отхода ОАО «Апатит» в качестве комплексного флюса в пирометаллургии меди ...	163
Охапкин К.А. Расчетно-теоретический анализ тепловых процессов при точечной сварке трением	172

Моделирование. Математические методы

Голод В.М., Орлова И.Г. Анализ структурной микронеоднородности низкоуглеродистых сталей на основе компьютерного моделирования условий их затвердевания	177
Русинов Р.В., Добрецов Р.Ю. Математическая модель теплового цикла поршневых двигателей внутреннего сгорания	182
Барышников С.О. Упругая устойчивость. Критерии устойчивости	188
Зубов И.Н., Зубов С.В., Стрекопытов С.А., Стрекопытова М.В. Устойчивость интегральных многообразий	191
Барышников С.О., Сухотерин М.В. К расчету судовых днищевых пластин	194
Голиков В.А., Жарковский А.А., Топаж Г.И. Программные комплексы для расчета течения и автоматизированного проектирования лопастных гидромашин	199
Наумов И.В. Анализ напряженного состояния упругого полупространства за пределами площадки нагружения	206
Иголкин Б.И., Воловей А.Г., Мехтиев В.С., Васипов В.В., Ребане К.Ю. Изменения электромагнитного состояния растительных масел по стадиям рафинации	220
Ястребов Ф.В. Моделирование плоских движений для имитации разрушений макетов	223
Наумов И.В. Определение реакции упругого полупространства под штампом прямоугольной формы .	227

Природопользование

Усманова Р.Р. Интенсификация процесса очистки дымовых газов при модернизации систем пылеулавливания	239
Молодкина Л.М., Андрианова М.Ю., Чусов А.Н. Спектрофлуориметрия в изучении динамики разложения биоорганических отходов	243
Хвостова М.С. Инженерно-экологические аспекты вывода из эксплуатации плавучей атомной электростанции	251

Техносферная безопасность

Гуменюк В.И., Кулинкович А.В. Влияние процессов трансформации рассеянной энергии ассоциированных состояний воды на генерацию активных форм кислорода в растворах солей урана	255
---	-----

Попов В.Ю., Федосовский М.Е., Туманов А.Ю. Мониторинг изотопов ксенона для определения аварийных и предаварийных состояний на ядерных энергетических объектах	263
Куракин А.С., Холодкевич С.В., Пурвиня С., Барда И., Римша Э., Кулинкович А.В. Оценка экологического состояния акватории рижского залива	267
Доброборский Б.С., Гуменюк В.И., Федософский М.Е. Причина аварии на Саяно-Шушенской ГЭС — человеческий фактор	272

Вопросы образования

Кожевников Н.М. Деятельность Научно-методического совета по физике в условиях перехода к «уровню новой системе» высшего образования	277
Дмитриев А.Г., Козелецкая Т.А., Герман Е.А. О дополнительных возможностях математического моделирования в гуманитарных областях знаний	282

Хроника событий

Васильев Ю.С. Инженер и ученый Николай Александрович Малышев	291
Кесаманлы Ф.П. Политехники — трижды Герои Социалистического Труда. Академик Яков Борисович Зельдович	293
Морачевский А.Г. Академик Николай Васильевич Белов (к 120-летию со дня рождения)	299
<i>Сведения об авторах, контактные данные</i>	304
<i>Аннотации, ключевые слова</i>	311

Contents

Congratulations	9
-----------------------	---

By the 110-th anniversary of the opening of STU

Degtyareva R.V. Supreme governing body of institution of higher education	11
Lopota V.A. Space and XXI Century	29
Yurevich E.I. Prospects for the development of extreme robotics	38

Power engineering and electrical engineering

Frolov V.Y., Korotkov A.V. About the improving of accuracy of definition of load losses of electrical energy and structure of actual losses	41
Sysoev A.V., Smolovik S.V. Ways for prevention of the development of emergency state power system if one intersystem connection is faulted	45
Epifanov A.A., Kirillov A.I., Rassokhin V.A. Gas-dynamic computation of low flow rate turbines blade cascades characteristic	50
Vasilenko G.V., Amosov N.T. Investigation of central heating heaters on power unit T-180-130 and suggestions to reduce their damageability	55
Korovkin N.V., Kalashnicov V.S., Kirpanev A.V. Cylindrical scanning in tasks of electromagnetic compatibility	60
Epifanov A.A., Kirillov A.I., Rassokhin V.A. Computation of three-dimensional flow at low flow rate turbines stages	65
Loginov S.Y. Lowering interaction radial forces in the bearingless reluctance motor	70
Tsygankova Y.S. Decomposition approach of heat losses calculation in heat supply network	75
Ustinov D.A., Konovalov J.V., Plotnikov I.G. Certification of electric load oil and gas companies	81
Tananaev A.V. For liquid metal fusion reactor in the blanket	84
Petrov N.V. Investigation of local energy release in water near the free surface	92
Batukhtin A.G., Safronov P.G., Kirillov M.V. Optimization of pre-heating cold air to the boiler air heaters (illustrated Kharanorskaya TPP)	97
Mityugin A.A., Yakovlev V.I. The study of high electromagnetic interference in the electrical network when disconnecting the short-circuit	103
Anisimova E.B., Bogdanov J.V. The perspective innovative direction of using high-temperature gas-cooled reactors in floating nuclear steam power plants	108
Rumaherang W.M., Topazh G.I., Zakharov A.V. Method of calculation for determining cavitation performance of hydraulic turbines	112
Rassokhin V.A., Zabelin N.A., Matveev Y.V., Kharisov I.S. Methods for experimental studies of low power turbines steps to stand polytechnic university	119

Mechanical engineering

Shelomov V.B., Dobretsov R.Yu. Refinement of the swivel movement model of the tracked vehicle	123
Dudnik T.A., Bogov I.A. About rationing of calculations of threaded connections on the fragile strength ..	128
Maslov V.I., Arustamyan A.I. Improving pirozvodstva piston rings	132
Dudnik T.A., Bogov I.A., Laskin A.S. Determination maximum allowable defect sizes of the workpieces large rotor shafts	137
Radkevich M.M., Fomin D.U. The physical modelling of the technological process under semihot forging .	143
Ushakov A.P. Informativity of the laser vibration diagnostics of machines and constructions	147

Metallurgy and materials technology

Orischenko A.S., Kondratyev S.Yu., Anastasiadi G.P., Fuks M.D., Petrov S.N. Features of structural changes in heat-resistant alloy 45X26H33C2B2 at operating temperatures. Record 1: Cast state	155
Popov I., Mitrofanov Y. Scientific and practical foundations of aegirine concentrate – industrial waste open society «apatite» as the integrated flux in pyrometallurgy of copper	163
Okhapkin K.A. Theoretical analysis of heat transfer processes during spot stir welding	172

Modeling. Mathematical methods

Golod V.M., Orlova I.G. Analysis of structural microinhomogeneity in low carbon steels based on a computer modeling of it's solidification	177
Rusinov R.V., Dobretsov R.Yu. Mathematical model of the reciprocating internal combustion engine thermal cycle	182
Baryshnikov S.O. Elastic stability. Criteria for stability	188
Zubov I.N., Zubov S.V., Strecopitov S.A., Strecopitova M.V. Stability intergral multitudes	191
Baryshnikov S.O., Suhoterin M.V. Calculation of ship bottom plates	194
Golikov V.A., Zharkovsky A.A., Topazh G.I. Software tools for numerical calculations of the currents and computer-aided design of the bladed hydromachines	199
Naumov I.V. Analysis of the stressed state of an elastic half-space off-site loading	206
Igolkin B.I., Volovey A.G., Mekhtiev V.S., Vasipov V.V., Rebane K.Y. The electromagnetic state of vegetable oils on stage refining	220
Yastrebov P.V. Simulation of plane motion model for simulation of destruction	223
Naumov I.V. Determination of reaction elastic half-space under the die rectangular shape	227

Nature management

Usmanova R.R. Intensification of process of clearing of smoke gases at modernization of systems dust separation	239
Molodkina L.M., Andrianova M.Yu., Chusov A.N. Spectrofluorimetry in studying the dynamics of the degradation of bio-organic waste	243
Khvostova M.S. Engineering-ecological aspects of a decommissioning of the floating nuclear power plant ..	251

Technospheric security

Gumenyuk V.I., Kulinkovich A.V. Influence of processes of transformation of absent-minded energy the associated conditions of water on generation active forms of oxygen in solutions of salts of uranium	255
--	-----

Popov V.Yu., Fedosovskiy M.E., Tumanov A.Yu. Monitoring of xenon isotopes for the tasks of determination accidents on the nuclear facilities 263

Kurakin A.S., Kholodkevich S.V., Purviņa S., Bārda I., Rimša E., Kulinkovich A.V. Assessment of environmental baltic sea 267

Dobroborskij B.S., Gumenyuk V.I., Fedosovskij M.E. Analysis of the causes of the accident at GES 272

Educational issues

Kozhevnikov N.M. The scientific-methodical council activity under transition to "level system" of high education 277

Dmitriev A.G., Kozeletskaja T.A., German E.A. About the additional possibilities of mathematical modeling in humanitarian fields of knowledge 282

Chronicle of events

Vasiliev Yu.S. Engineer and scientist Nikolai Malyshev 291

Kesamanly F.P. Polytechnic — three heroes of socialist labor. Academician Yakov Borisovich Zeldovich 293

Morachevsky A.G. Academician Nikolai Belov (on the 120th anniversary of his birth) 299

About the authors, contact information 304

Abstracts, key words 318



ПОЗДРАВЛЕНИЕ

На прошедшей 22 декабря 2011 года сессии Российской академии наук состоялись выборы, на которых двое петербуржцев-политехников стали академиками и пятеро — членами-корреспондентами РАН.

От имени коллектива Санкт-Петербургского государственного политехнического национального исследовательского университета и от себя лично поздравляю выпускников и профессоров в связи с их избранием в Российскую академию наук. Такой блестящий результат достигнут впервые за всю историю нашего университета. Это — свидетельство высокого уровня подготовки специалистов в Политехническом институте-университете.

Ректор, член-корреспондент РАН

А.И. Рудской

Действительными членами РАН избраны:



Михаил Петрович Федоров

Научный руководитель Программы национального исследовательского университета СПбГПУ, профессор кафедры гражданского строительства и прикладной экологии инженерно-строительного факультета.

Избран по Отделению энергетики, машиностроения, механики и процессов управления



Владимир Валентинович Окрепилов

Генеральный директор ФГУ «Центр испытаний и сертификации» Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии Росстандарта. Советник ректора, профессор.

Избран по Отделению общественных наук

Членами-корреспондентами РАН избраны:



Владимир Николаевич Васильев

Ректор Санкт-Петербургского государственного национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Председатель Совета ректоров вузов Санкт-Петербурга. Почетный профессор СПбГПУ. Выпускник Политехнического института 1974 года.

Избран по Отделению нанотехнологий и информационных технологий



Юрий Кириллович Петреня

Заместитель генерального директора — технический директор ОАО «Силовые машины», профессор, зав. кафедрой энергетического машиностроения (базовая) энергомашиностроительного факультета.

Избран по Отделению энергетики, машиностроения, механики и процессов управления



Михаил Владимирович Сильников

Генеральный директор ЗАО НПО «Специальные материалы», профессор кафедры безопасности социальных и технических систем факультета комплексной безопасности.

Избран по Отделению энергетики, машиностроения, механики и процессов управления



Герман Абрамович Шнеерсон

Профессор кафедры электроэнергетики и техники высоких напряжений электромеханического факультета.

Избран по Отделению энергетики, машиностроения, механики и процессов управления



Леонид Абрамович Вайсберг

Научный руководитель, председатель совета директоров НПК «Механобр-Техника», профессор кафедры транспортных и технических систем меканико-машиностроительного факультета.

Избран по Отделению наук о Земле

*К поздравлению ректора присоединяются Редакционный совет
и Редакционная коллегия журнала*



К 110-летию ОТКРЫТИЯ СПБГПУ

УДК 378.1

P.B. Дегтярева

ВЫСШИЙ ОРГАН УПРАВЛЕНИЯ ВУЗОМ

В XXI веке общее руководство вузом осуществляет выборный представительный орган — Ученый совет вуза (1). Но так было далеко не всегда. С момента основания и до настоящего времени в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете этот орган управления назывался по-разному, да и функции у него были разные.

Первое заседание Совета политехнического института состоялось 110 лет назад — 16 сентября 1902 года. В заседании под председательством директора института А.Г. Гагарина приняли участие профессора Н.А. Меншуткин, А.С. Посников, М.А. Шателен, Н.С. Курнаков, А.А. Ржеттарский, Ф.Ю. Левинсон-Лессинг, А.П. Македонский, В.В. Скобельцын, И.И. Иванов, И.В. Мещерский, А.Г. Гусаков, В.И. Станиевич, И.М. Грэвс, А.С. Ломшаков, секретарь Совета — А.Г. Гусаков.

По дореволюционному Уставу в состав Совета входили директор института, он же был и председателем Совета, и все профессора (ординарные и экстраординарные, а также преподаватель богословия). С 1908 года должность директора института стала выборной, и избирали его только профессора — члены Совета. Совет как орган институтского управления стал избираться после 1918 года. Все вопросы жизни института (открытие новых отделений, кадровые вопросы и т. д.) были в центре внимания Совета.

Но Совет политехнического института не замыкался только на внутренних проблемах. Совет вуза и профессора института всегда откликались на крупные общественно-политические события российской жизни.

В 1905 году с «кровавого воскресенья» началась Первая русская буржуазно-демократическая революция. Историческая обстановка в стране сказалась и на работе Совета политех-

нического института. Например, 10 января 1905 года состоялось его экстренное заседание, на котором заслушали результаты медицинской комиссии по поводу убитого студента экономического отделения Н.В. Савинкина. Совет единогласно постановил, что в подобной ситуации проведение учебных занятий невозможно, о чем информировали Министерство. Расходы на похоронение студента выделил институт, и на похоронах Н.П. Савинкина присутствовали все члены Совета.

Весной 1905 года не прекращались забастовки и митинги, в том числе и студенческие. 16 и 17 октября того же года состоялись экстренные заседания Совета, на которых обсуждалась категорическая телеграмма Министерства: «Закрыть институт впредь до особого распоряжения, имеющего последовать в ближайшие дни». На заседании Совета 17 октября после продолжительных прений было вынесено постановление: «Не закрывать институт».

Весной и летом 1905 года имел место еще один конфликт профессорско-преподавательского персонала института с представителями власти. 22 марта 1905 года на экономическом отделении был избран преподавателем по истории английского государственного права известный русский социолог и историк профессор М.М. Ковалевский. 30 марта Совет института единогласно утвердил его избрание. Но петербургский генерал-губернатор Трепов попытался отменить это решение и обратился за поддержкой в правительство. Поведение Трепова подверглось острой критике со стороны политехников. В начале сентября была избрана специальная комиссия профессоров института (9 человек) для выработки решения по этому вопросу. В результате работы комиссии вопреки требованию Трепова Совет института 21 сентября 1905 года признал невоз-

можным отменить свое законное решение о приглашении профессора М.М. Ковалевского и единогласно постановил: «Не исключать означенного курса из расписания лекций». Свое решение Совет довел до сведения правительства.

В годы первой русской революции ввиду активной позиции профессоров, преподавателей и студентов сложилось общественное мнение о Политехническом институте как «о змеином гнезде», «лаборатории бомб». Директору института князю А.Г. Гагарину, заведующему студентами профессору члену Совета В.И. Станевичу и его двум помощникам, М.М. Матусевичу и Д.Д. Устругову, было предъявлено обвинение в бездействии власти и допущении беспорядков в общежитиях, и они привлекались к суду. В феврале 1907 года князь А.Г. Гагарин, председатель Совета, был уволен с поста директора института. Несмотря на это, 3 марта 1907 года Совет института избирает его почетным членом института.

28 февраля 1915 года умер С.Ю. Витте. 4 марта на заседании Совета почтили память первого почетного члена института графа Сергея Юльевича Витте. Совет постановил учредить 6 стипендий имени С.Ю. Витте, по одной на каждое отделение, по 360 рублей с освобождением стипендиатов от платы за учебу, и поместить в главном здании института бюст покойного с надписью, что С.Ю. Витте был устроителем института.

После начала Первой мировой войны Совет института на своих заседаниях много внимания уделял вопросам, связанным с нуждами военного времени и обороны страны. Так, в сентябре 1915 года Совет принял решение, в котором подчеркивалось: «В настоящий момент величайшего национального напряжения в борьбе с внешними врагами все личные научные и научно-технические силы, которыми располагает институт, необходимо использовать в целях посильного содействия государственной обороне и хозяйственной организации тыла». На этом же заседании было решено удовлетворить просьбы Красного Креста о расширении госпиталя, предоставив ему не только 3 и 4 этажи III-го общежития, но и верхние этажи II-го общежития с тем, чтобы развернуть до 1300 кроватей.

Тревожно для России начался 1917 год. После образования Временного комитета Государственной думы Совет института 28 февраля признал власть Государственной думы как законную власть в России.

По всей вероятности, такое решение Совета разделяли не все преподаватели института. 8 марта 1917 года в институте состоялось собрание преподавателей, не входящих в состав Совета. Были избраны уполномоченные, которые уведомили директора, что преподаватели объединились в особую организацию и просят ознакомить их со всеми постановлениями Совета, а в случае выступления с заявлениями точно указывать, от какой именно группы исходит данное заявление.

В октябре 1917 года в России произошла социалистическая революция.

В конце октября того же года в Петрограде состоялось заседание директоров высших учебных заведений по поводу октябрьских событий и было принято постановление — не признавать власть народных комиссаров и ни в какие отношения с ними не вступать.

Совет Политехнического института на своем заседании 8 ноября обсуждал это постановление и единогласно принял резолюцию, в которой отмечалось: «Не входя в обсуждение политической катастрофы, которая постигла Российское государство, Совет Политехнического института решительно протестует против лишения свободы профессора М.В. Бернацкого».

25 ноября 1917 года Совет института обсуждал предложение Академии наук присоединиться к составленному ею воззванию, осуждающему Октябрьскую революцию, и принял решение не присоединяться к воззванию.

Большая часть профессоров, преподавателей признала Советскую власть и начала с ней сотрудничать.

24 января 1918 года Совет института на своем заседании уполномочил председателя Совета А.А. Радига правами по установлению отношений с существующей властью для обеспечения институту его деятельности на автономных началах.

27 ноября 1918 года Совет принял новый Устав Политехнического института. Основной задачей института в советский период стала подготовка специалистов для промышленности и сельского хозяйства, а также научно-педагогических кадров для высших учебных заведений и научно-исследовательских учреждений.

Начиная с тридцатых годов XX века в связи с начавшейся индустриализацией страны резко возросла потребность в практически подготов-



ленных инженерах, способных участвовать в проектных работах, организации и управлении производством. Стали требоваться в возрастающем количестве инженеры, специализированные сравнительно узко, но способные в кратчайшие сроки после институтской скамьи включиться в практическую работу. Процесс перехода к индустриальному обществу потребовал создания множества новых учебных институтов, профилированных в определенных областях знаний.

К 30-м годам партия большевиков сумела сформировать мощный механизм государственной власти и управления, регулирующий все стороны жизни советского общества. Большевики добивались всеохватывающего партийного и государственного влияния на политическую, экономическую и социальные отношения. После 300-летнего самодержавного царского правления в России трудно себе представить политическую партию, которая смогла бы сразу перейти к демократическому правлению. Случилось то, что случилось. Политехнический институт стал частью той системы и действовал соответствующим образом.

В 1930 году Ленинградский политехнический институт был расформирован. В резолюции, принятой ноябрьским 1929 года Пленумом ЦК ВКП(б), в части, касающейся управления в вузах, подчеркивалось, что необходимо «заменить выборность управления (ректоры, деканы и т. д.) назначением соответствующими руководящими органами». 17 января 1930 года в высшей школе было введено единоначалие: ректоры стали директорами, проректоры — помощниками директоров, деканы факультетов — заведующими факультетов. Советы институтов превращались в *совещательные органы* <выделено автором> при директоре, сформированные из представителей профессорско-преподавательского состава, промышленных объединений и трестов, профсоюзных и студенческих организаций [2, с. 6, 7, 56].

28 марта 1931 года в ЛМСИ опубликовано Положение о Совете института, в состав которого должны были войти директор, его четыре помощника, четверо заведующих отделениями и специальностями, четверо представителей общественных организаций института и семнадцать представителей объединений, заводов и НИИ. Проанализировать работу советов того периода не представляется возможным, поскольку протоколы советов отсутствуют.

В 1934 году вновь были объединены ряд отраслевых вузов и был образован Ленинградский индустриальный институт, в 1940 году он вернул прежнее название — Ленинградский политехнический институт — и стал носить имя М. И. Калинина.

С 1936 году по отдельным документам можно в некоторой степени проследить работу Совета института. В сентябре 1936 года Советом института была создана комиссия по подготовке к 35-летнему юбилею содня открытия Политехнического института, который отмечали в октябре 1937 года.

В июне 1937 года Совет института обсуждал извечно болезненный вопрос — о преподавании математики. В этом же году Всесоюзный комитет по высшей школе (ВКВШ) при Совнаркоме СССР потребовал проводить защиту докторских и кандидатских диссертаций на заседаниях Совета института, а не факультетских. Далеко не все ученые Индустриального института были согласны с этим, однако с конца 1937 года подобные защиты проходили именно на заседаниях Совета института.

В январе 1938 года на заседании Совета института обсуждался вопрос о положении дел в библиотеке вуза, которая по существу была одной из самых крупных в стране научно-технических библиотек. Заведующий фундаментальной библиотекой рассказал членам Совета о тяжелом положении, в котором она находилась. Отраслевые вузы при присоединении их к Индустриальному институту вернули только часть книг, доставшихся им в 1930 году. Было предложено, чтобы в Библиотечный совет, который был создан еще в 1934—1935 годах входили представители от каждого факультета. Кроме того, Совет принял решение обратиться к наркому связи с сокращением средств, необходимых для издания трудов ЛИИ [2, с. 183].

Постоянным вопросом, который обсуждался во все времена на заседаниях Совета, был кадровый. Так было и на заседании Совета в марте 1938 года, на котором подводился итог формирования профессорско-преподавательского штата.

В практику работы Совета института с 30-х годов вошли доклады деканов о решениях, принятых на факультетах, об итогах приема на первый курс, о научно-исследовательской деятельности и др.

12 сентября 1938 года в газетах был опубликован утвержденный Совнаркомом СССР проект типового Устава высшего учебного заведения. На следующий день 13 сентября заседал Совет ЛИИ, и на нем была создана «уставная комиссия» под председательством академика А.А. Байкова. В комиссию вошли: профессора Н.П. Виноградов, Б.Е. Воробьев, Б.Г. Галёркин, М.А. Шателен, начальник учебного отдела М.С. Старостин, заместитель директора И.Я. Звягинцев и четыре представителя от общественных организаций. Во второй половине октября «уставная комиссия» провела пять заседаний и подготовленный проект Устава ЛИИ представила Совету института на обсуждение. Спорных вопросов, несмотря на подготовительную работу, оказалось так много, что Совету пришлось заседать три дня подряд — 2–4 ноября. После принятия проекта Устава, он был сдан на утверждение в Главное управление учебных заведений. [5; 2, с. 209].

В соответствии с Уставом Ленинградского индустриального института, утвержденным 29 мая 1939 года Всесоюзным Комитетом по делам высшей школы при Совете Народных Комиссаров, Совет института создавался при директоре и под его председательством.

В Совет могли быть включены лица профессорско-преподавательского состава, а также представители предприятий и учреждений, для которых институт готовит специалистов. Personalный состав Совета утверждался Всесоюзным Комитетом по делам высшей школы при Совете Народных Комиссаров [3, с. 27–28].

Основные положения принятого Устава ЛИИ об управлении вузом, о месте Совета института нашли дальнейшее подтверждение или развитие в советский период в послевоенное время. Главное заложенное в нем концептуальное положение: Совет института как орган управления является *совещательным органом при ректоре, а его решения носят рекомендательный характер* *<выделено автором>*.

В советский период деятельность вузов, как и других учреждений, была жестко регламентирована. Все основные документы — Устав, Положения о Совете вуза, о факультете, кафедре и др. — были разработаны Министерством высшего и среднего специального образования СССР. Положение о Совете высшего учебного заведения было не только разработано этим министерством, но и согласовано с министерствами

и ведомствами СССР и союзных республик [4, с. 71–72]. Вот в соответствии с этим Положением и действовал Совет Ленинградского политехнического института. Он создавался *при ректоре* и был *совещательным органом*. Основные задачи Совета вуза заключались в выполнении решений Коммунистической партии и правительства и были направлены на объединение усилий всего коллектива высшего учебного заведения по «подготовке специалистов на основе соединения обучения с производительным трудом, по дальнейшему развитию научных исследований и проведению политico-воспитательной работы среди студентов» [4, с. 71].

Принцип формирования Совета свидетельствовал о главенствующей роли идеологии. В состав Совета входили ректор (председатель Совета), проректоры, заведующие кафедрами общественных наук и других ведущих кафедр *<выделено автором>*, представители партийной, комсомольской, профсоюзной организаций; в Положении перечисляются и другие должности, представители которых могли входить в состав Совета: руководители научных лабораторий, крупные ученые и специалисты отраслей народного хозяйства и культуры, связанные с работой вуза. Избирался Совет вуза советами факультетов открытым голосованием сроком на 3 года. Там, где не были созданы советы, члены Совета избирались общим собранием профессорско-преподавательского состава. Состав совета по представлению ректора утверждался Министерством.

По всем принципиальным и кадровым вопросам решениям Совета предшествовали решения партийных и советских органов. В качестве примера можно взять любой учебный год до 1985-го. Вот основные обсуждаемые вопросы 1981 года:

26 января — «Материально-техническая база института в 10-й пятилетке и перспективы ее развития»;

13 февраля — «Новые учебные планы — база повышения качества подготовки специалистов в свете постановления ЦК КПСС и СММ СССР «О дальнейшем развитии высшей школы»;

30 марта — «Итоги развития института в 1980 году и задачи коллектива в свете решений XXVI съезда КПСС» и «Итоги научной деятельности института за 1980 год и задачи коллектива на 11-ю пятилетку»;



27 апреля — «О состоянии учебной, научно-методической и воспитательной работы на инженерно-технических факультетах»;

25 мая — «О состоянии и планах реконструкции учебной лаборатории кафедры электротехники и электроэнергетики»;

22 июня — «О состоянии учебной, научно-методической и идейно-воспитательной работы на кафедре политической экономии в свете реализации постановления ЦК КПСС и СМ СССР “О дальнейшем развитии высшей школы” и ЦК КПСС “О дальнейшем улучшении идеологической политики-воспитательной работы”».

Заседания Совета проводились ежемесячно, таким образом, за год было 10 заседаний.

В качестве докладчиков, как правило, выступали проректоры, деканы, заведующие кафедрами, члены Совета.

Ситуация меняется с началом в СССР перестройки — с апреля 1985 года. В мае 1985 года Политехнический институт посетил автор перестройки Генеральный секретарь ЦК КПСС М.С. Горбачев. Во время этого посещения М.С. Горбачевым были сформулированы основные положения реформы высшей школы.

На заседании Ученого совета в мае 1985 года обсуждались решения Пленума ЦК КПСС «Основные направления перестройки высшего и среднего специального образования в стране». На основе этих решений в институте были разработаны концепции их реализации.

Профessorско-преподавательский состав, студенчество активно включились в процесс перестройки. Тогда никому в голову не могло прийти, что через несколько лет, а точнее в 1991 году, он — Генеральный секретарь ЦК КПСС М.С. Горбачев — может стать свидетелем на судебном процессе над КПСС, где фактически рядовых членов партии подвергли суду.

В то время не предполагали и не понимали, что наступает новый этап в жизни нашего Отечества, что в 1991 году произойдет развал Советского Союза, канет в Лету «руководящая и направляющая сила» КПСС. Впереди будут «путч» 1991 год и расстрел Белого дома в 1993 году.

Далеко не сразу руководители и преподаватели высших учебных заведений поняли, что происходит закат советской эпохи. В материалах съездов и пленумов ЦК КПСС главные идеологии партии продолжали давать им прежние установки на построение социализма «с человечес-

ским лицом», ускорение социально-экономического развития советского общества, воспитание студентов в духе марксизма-ленинизма и пролетарского интернационализма и т. д. Все это сопровождалось лозунгом «Больше социализма». Провозглашали борьбу за ленинский стиль руководства партией и страной. «Архитектор перестройки» А.Н. Яковлев, отвечая на вопрос корреспондента «Литературной газеты» в октябре 2001 года, откровенно сказал, что советский строй можно было взорвать только изнутри, «используя его тоталитарную пружину — партию. Используя такие факторы, как дисциплина и воспитанное годами доверие к Генеральному секретарю, Политбюро... Так вот с этого мы и начали... На апрельском Пленуме прозвучал тезис о свободе выбора. *Проглотили*. Прозвучал тезис о развитии демократии — в двух-трех случаях без эпитета «социалистической». *Проглотили*. Промелькнули слова об инициативе людей как примате, основе развития общества. *Проглотили...* пусть новый генсек поговорит. Покажет, какой он широкий парень; *делать-то мы будем все равно по-своему* <выделено автором> [5, с. 309]. А.Н. Яковлев позже еще более цинично заявил, что «для пользы дела приходилось отступать и лукавить. Я сам грешен — лукавил не раз. Говорил про «обновление социализма», а сам знал, к чему дело идет» [5, с. 338]. Но тогда, в перестрочные времена, ему верили и на него надеялись.

В 1986 году состоялся XXVII съезд КПСС, на котором была утверждена новая редакция программы Коммунистической партии. В V разделе программы КПСС «Идейно-воспитательная работа, образование, наука и культура» подчеркивалось, что «КПСС будет продолжать совершенствовать систему народного образования с учетом потребностей ускорения социально-экономического развития, *перспектив коммунистического строительства* <выделено автором>. По документам партия не отказывалась от идеи построения коммунизма, только сроки обозначались не конкретно по-хрущевски, а расплывчато, по-горбачевски — «перспективно».

Можно и дальше продолжать цитировать, но не в этом дело. А дело в том, что руководители, преподаватели вузов находились под прессом противоречий — указаний «сверху», которые процитированы выше, и реальной жизни. В реальной жизни митинги и демонстрации проходили под лозунгами «КПСС, дай порулить!»,

«Вся власть советам!». На практике постепенно стали меняться исторические оценки пройденного пути. Такие понятия, как взаимопомощь, доброжелательность, коллективизм, стали наполняться новым содержанием. Но пока еще профессорско-преподавательский состав продолжал верить партии, ведь она сама начала перестройку и реформы.

Плюрализм, гласность, демократические преобразования в высшей школе выражались и в том, что были расширены права вуза в целом и права Совета в том числе, который по документам теперь назывался *Ученым советом вуза <выделено автором>*.

Демократизация деятельности Ученого совета Политехнического института проявлялась и в том, что в его состав вошли студенты, аспиранты. 28 декабря 1987 года состоялось расширенное заседание Ученого совета, комитета комсомола и студенческого профкома ЛПИ им. М.И. Калинина. Был рассмотрен вопрос «О первоочередных мерах по расширению участия студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов в управлении вузом». Принято решение о введении в состав ученых советов института и факультетов представителей студенческих коллективов. Их число должно составлять четверть численности ученых советов. По предложению студенческих комсомольских и профсоюзных организаций Ученый совет вуза принял решение о переводе общежитий на частичное и полное самоуправление в вопросах поддержания в них порядка, санитарного состояния и т. д. Своим решением Ученый совет ЛПИ ввел в практику периодические отчеты штатного персонала общежитий на заседаниях студсоветов, обязательное согласование с профкомом студентов кандидатур комендантов общежитий, принимаемых на работу, а также их увольнение [6].

До перестройки Ученый совет никак не влиял на избрание ректора, который назначался Министерством высшего и среднего специального образования, естественно, после согласования с партийными органами. Председателем Ученого совета в то время был ректор — доктор технических наук, профессор член-корреспондент РАН Юрий Сергеевич Васильев. Это стратегически мыслящий человек, человек высокой культуры, имеющий свое стержневое философское мировоззрение, оперативно реагирующий на происходящие события и умеющий их ана-

лизировать, преданный Политехническому институту и любящий людей. Наверное, только такие люди, как Юрий Сергеевич, могли выдержать те физические и моральные нагрузки, которые выпали на их долю в перестроочный период. Он родился 10 апреля 1929 года в г. Иркутске. В 1951 году окончил гидротехнический факультет ЛПИ по специальности «Гидротехническое строительство». Работает по настоящее время на кафедре «Возобновляющиеся источники энергии и гидроэнергетика» (ранее «Использование водной энергии»). Занимал должности ассистента (1951–1963), доцента (1963–1974), профессора (1974 — по настоящее время); с 1976 по 1999 год — заведующий кафедрой. Прошел большую школу жизни в качестве секретаря парткома ЛПИ. С 1983 года — ректор Ленинградского политехнического института, с 1995 г. — президент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. В 1962 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук, в 1972 году — доктора технических наук.

В соответствии с приказом Минвуза СССР от 12 июня 1987 года, которым было утверждено Положение о порядке выборов ректоров и порядке отчетов ректоров, 30 мая 1988 года было проведено расширенное заседание Ученого совета Ленинградского политехнического института.

Ученым секретарем совета был утвержден доктор экономических наук профессор Владимир Викторович Глухов, один из самых молодых профессоров. Тогда ему было 40 лет, звание профессора он получил в 36 лет. Диссертацию на соискание ученой степени кандидата экономических наук защитил в 1973 года — в 26 лет, докторскую диссертацию защитил в 34 года. В советский период это было крайне редко. Он окончил физико-механический факультет ЛПИ по специальности «Системы автоматического управления» и был оставлен на кафедре автоматизации metallургических процессов. С 1972 года работает на кафедре экономики и управления metallургическим процессом (в современный период это на факультете экономики и менеджмента). Владимир Викторович прошел путь от ассистента до профессора, заведующего кафедрой. За ум, талант, огромную работоспособность, коммуникабельность его избрали ученым секретарем Совета вуза.

Основная задача расширенного заседания Ученого совета, которое состоялось 30 мая 1988 года,



заключалась в принятии решения о продлении срока полномочий действующего ректора на новый пятилетний срок после его отчета за работу, проделанную в предыдущие годы. Это был своеобразный шаг к демократическим выборам ректоров вузов. Но ситуация осложнялась тем, что высшие учебные заведения при выборах ректоров или продлении их полномочий в должности руководствовались приказом Минвуза СССР от 12 июня 1987 года. Работа по его исполнению началась в сентябре того же года, а вскоре, 11 февраля 1988 года были внесены изменения в Кодекс закона о труде, 235 статья которого была посвящена выборам руководителей трудовых коллективов. Получалось так, что теперь ректоры вузов должны избираться на общем собрании соответствующих коллективов и утверждаться в установленном порядке.

С этого и началось... Правомочно ли расширенное заседание Ученого совета? Не нарушается ли 235 статья Кодекса закона о труде? И т. д., и т. п.

Заседание проходило в актовом зале института, который рассчитан на 600 мест. Ни одного свободного места не было. В такой напряженной ситуации выступил председатель Ученого совета ректор Ю.С. Васильев с отчетным докладом *о своей деятельности* за период 1983–1988 годов. Традиционно ректор всегда отчитывался за *работу вуза в целом*, ибо он несет персональную ответственность за его деятельность. В период перестройки упор делался на личную ответственность, в таком случае его легче было снять с должности.

В докладе на расширенном заседании Совета Ю.С. Васильев отмечал, что новая концепция высшего образования в стране заключалась в интеграции обучения — науки — производства. Применительно к ЛПИ это означало, что более эффективно использовался потенциал промышленных предприятий и научных учреждений Ленинграда. На 1988 год институт имел 36 филиалов кафедр и 4 научно-учебных комплекса. Благодаря этому студенты старших курсов получили доступ к современным приборам и оборудованию. За 1983–1985 годы по дневной форме обучения в ЛПИ подготовлено 10 тысяч инженеров. Со стороны предприятий, куда были направлены выпускники Политехнического, поступали положительные отзывы [7]. Впервые в стране в ЛПИ был создан отраслевой факуль-

тет автоматики, вычислительной техники и радиоэлектроники на новых принципах обучения.

Ежегодно диссертационные (тогда они назывались специализированными) советы ВАК СССР, созданные на базе ЛПИ, ежегодно рассматривали до 40 диссертаций на соискание ученой степени доктора наук и около 300 — на соискание ученой степени кандидата наук. По отношению к общим показателям ВАК СССР диссертационные советы, работавшие на базе Ленинградского политехнического института, давали 1,2 % докторских и 1 % кандидатских диссертаций в стране.

Большие успехи сопутствовали ученым ЛПИ в области физики твердого тела, микроэлектроники, энергетики, электроники, машиностроения, гидротехники, приборостроения и других областей науки.

Перестройка учебных планов и программ была направлена на усиление фундаментальной подготовки специалистов. Упор делался на индивидуальные формы обучения. Преподавателям было предоставлено больше свобод не только в видах изложения материала, но и формах его контроля, т. е. меньше регламентировался педагогический процесс. Особенно тяжело было преподавателям кафедр общественных наук. Учебников не было, средства массовой информации ежедневно доносили все новую и новую информацию, которую приходилось быстро анализировать.

Ректор ЛПИ был председателем Совета кафедр общественных наук, которые в советский период находились в прямом подчинении ректората. Конечно, в своем докладе Ю.С. Васильев не мог обойти и этот вопрос. В частности, он отметил, что в Политехническом институте в 1985 году по решению Ученого совета института был создан факультет общественных наук (ФОН).

По окончании доклада Ю.С. Васильеву было задано свыше 50 вопросов, а в прениях приняли участие 44 человека. Расширенное заседание Ученого совета длилось более шести часов. «Такого эмоционального накала, порой граничащего с элементарным бескультурьем «приглашенных», давно не видел ЛПИ, — писала в информационном отчете газета «Политехник». — Выяснилось, что многие из присутствующих, как говорится, «без понятия» не только о том, как ведутся дискуссии, но и просто не умели конкретно задавать вопросы, без оскорблений

ний и унижений» [8]. По результатам тайного голосования члену-корреспонденту РАН ректору Ю.С. Васильеву был продлен срок пребывания в должности на 5 лет.

Такое подробное изложение материала о расширенном заседании Ученого совета потребовалось, чтобы показать, как Совет вуза постепенно из совещательного органа власти *превращается в самостоятельный представительный выборный орган высшего учебного заведения*. Но приведенные факты также свидетельствуют о еще существовавшей зависимости от партийной организации и партийного комитета ЛПИ.

К 1989 году обстановка в стране резко меняется. Общественно-политическая ситуация во многом определялась выборами на I съезд народных депутатов СССР, работа которого означала вступление реформы политической системы в практическую fazu. Реформа политической системы связывалась с превращением Советов в главный источник власти, что на политическом языке означало необходимость отмены 6-й статьи Конституции СССР, закреплявшей ведущую роль КПСС. Постепенно стала складываться организованная политическая оппозиция партии, которая вырастала из неформальных клубных объединений. Она захватывала широкие слои населения. В этом движении принимали активное участие сотрудники Ленинградского политехнического института. Ведь неслучайно почти все лидеры партии и государства считали необходимым и возможным посещение Политехнического института. В ЛПИ были М.С. Горбачев (в мае 1985 года), Б.Н. Ельцин (9 февраля 1990 года), Р.И. Хасбулатов, Г.А. Зюганов и др.

В тот период главной «головной болью» Ученого совета ЛПИ, как и других вузов, становится преподавание общественных наук. Эти вопросы обсуждались почти на каждом заседании Ученого совета.

Ученым советом Политехнического института было принято решение от 30 октября 1989 года (протокол № 8): кафедра истории КПСС была переименована в кафедру истории (заведующий кафедрой — доктор исторических наук профессор Р.В. Дегтярева), кафедра марксистско-ленинской философии — в кафедру философии (заведующий кафедрой — доктор философских наук профессор Игорь Михайлович Рогов), кафедра научного коммунизма — в кафедру политологии (заведующий кафедрой —

доктор философских наук профессор Михаил Алексеевич Василик).

В ноябре 1990 года решением Ученого совета вуза (протокол № 9) факультет общественных наук был преобразован в гуманитарный факультет с включением в него дополнительно ряда кафедр: иностранных языков (заведующий кафедрой которой был профессор Л.В. Банкевич), русского языка (заведующий кафедрой — профессор А.Г. Серебренникова), физической культуры (заведующий кафедрой — доцент П.В. Половников), отечественной и зарубежной культуры (заведующий кафедрой — доцент И.В. Новожилова), инженерной психологии и педагогики (заведующий кафедрой — доктор технических наук профессор В.А. Жуков). В декабре 1990 года был избран Ученый совет гуманитарного факультета. Первым его деканом 21 декабря 1990 года избран профессор М.А. Василик.

По ходатайству Ученого совета 3 апреля 1990 года Ленинградский политехнический институт получил статус государственного технического университета.

В марте 1990 года на III съезде народных депутатов была отменена 6-я статья Конституции о руководящей роли КПСС.

Отмена 6-й статьи Конституции на местах, в высших учебных заведениях, означала передачу властных функций партийной организации и партийного комитета Ученому совету вуза, на факультетах — ученым советам факультетов. *К такому повороту событий ни те, ни другие не были организационно подготовлены, что приводило к снижению уровня управляемости.*

В 1990 году в результате сложных политических, экономических и идеологических процессов перестроичного времени в СССР была легализована частная собственность. Позднее, с конца декабря 1991 года, начнется процесс приватизации. Крыночным преобразованиям такого плана в ЛГТУ были готовы далеко не все. В условиях сокращения бюджетного финансирования и заказов промышленности на научные разработки университета все отчетливее звучал вопрос: как выжить? Профком сотрудников в своем обращении к Ученому совету ЛГТУ, принятому в канун Нового года, 20 декабря 1990 года, требовал от администрации университета реального плана по выводу Университета из кризиса.

В тот период перед Ученым советом Технического университета стояла задача как можно



быстрее стать действительно высшим органом управления в вузе. А ситуация все больше и больше осложнялась.

В декабре 1991 года произошел распад СССР. Шел передел власти и собственности. В течение 1992 года нарастало противоборство между законодательной и исполнительной властью, которое историки назвали «кризисом двоевластия». Двоевластие закончилось расстрелом Белого дома 3–4 октября 1993 года. Дальнейшая судьба Советов была решена Указом Б.Н. Ельцина от 26 октября 1993 года «О реформе местного самоуправления в Российской Федерации», которым прекращалась деятельность всех местных Советов. Их функции передавались назначаемой президентом Администрации. Советская власть через 76 лет после ее провозглашения в России перестала существовать.

Реформы разворачивались без соответствующей законодательной базы. Решения, принимаемые лидерами страны, в тот период определялись не Конституцией и Законами СССР, а «политической целесообразностью». V-й (внечередной) съезд народных депутатов СССР, который состоялся в сентябре 1991 года, объявил о вступлении страны в переходный период. Но на вопрос, куда переходим, ответа не было.

Кардинальные изменения в стране, естественно, оказались и на работе отдельных учреждений. И в этот сложный исторический период проходил процесс становления Ученого совета как высшего представительного органа власти вуза.

Основные вопросы, которые стали предметом обсуждения на заседаниях Ученого совета в 1991 году, были связаны с одной проблемой — проблемой «выживания» Университета.

28 января. «Состояние и развитие послевузовского образования в ЛГТУ». Докладчик — директор Межотраслевого института повышения кадров профессор Е.С. Озеров.

В докладе было отмечено, что коллектив университета выполняет социальный заказ общества, обеспечивая свою жизнедеятельность и развитие за счет ресурсов заказчика. Были две формы финансирования работ по послевузовскому образованию: госбюджет — обучение преподавателей и руководителей высшей школы; хоздоговор — обучение специалистов и руководителей народного хозяйства.

В условиях перехода к рынку намечалось изменение структуры социального заказа высшей

школе: уменьшался спрос на молодых специалистов и уменьшался объем заказов на выполнение научно-исследовательских работ; повышенный спрос на переподготовку кадров по некоторым направлениям техники, технологии, менеджмента, маркетинга, предпринимательства.

В организации последипломного образования в ЛГТУ участие принимали: ФПК — факультет повышения квалификации преподавателей (декан — профессор В.А. Жуков); СП — специальный факультет по переподготовке кадров по новым перспективным направлениям науки и техники (декан — профессор А.М. Яшин); УЦ — Учебный центр Гособразования СССР (директор — профессор А.В. Федотов); МИПК — Межотраслевой институт повышения кадров (директор — профессор Е.С. Озеров).

Кроме того, обучением руководителей народного хозяйства занимались юридически самостоятельные дочерние предприятия: Центр менеджмента и маркетинга «Прогресс» (ЦММ) — директор А.Н. Кобышев (центр был создан при ЛГТУ Советом Министров СССР и правительством земли Баден-Вюртенберг); совместное советско-австрийское предприятие «Международный менеджмент, маркетинг и технологии» (ММТИ) — директор В.О. Лебедев.

Подразделения послевузовского образования ЛГТУ и его дочерние предприятия обучили в 1990 году 8 300 человек при среднегодовой численности около 730 чел.

В 1991 году на углубление противостояния между российскими и союзовыми властями оказали столкновения гражданского населения и подразделений армии, МВД в Литве и Латвии. В Вильнюсе в ночь с 12 на 13 января 1991 года при попытке захвата телевизионного центра пролилась кровь. Нарастало недовольство сложившейся ситуацией.

28 января на заседании Ученого совета обсуждалось письмо директора Института физико-технических проблем энергетики Академии наук Литвы в связи с вводом советских (*тогда еще советских — <авт.>*) войск в январе 1991 года. Члены Ученого совета выразили озабоченность в связи с происшедшими событиями и надежду на политическое решение [9, протокол № 1].

25 февраля 1991 года. Вопрос «О повышении качества подготовки специалистов в Псковском филиале ЛГТУ». Докладчик — директор филиала профессор Н.П. Солнышкин.

Отмечалось, что ведется поиск новых форм организации учебного процесса. Все кафедры филиала участвовали в разработках по проблемам высшей школы («Разработка методики комплексной организации самостоятельной работы конкретной специальности», «Учебно-лабораторное оборудование и методика подготовки специалистов в области робототехники» и др.).

В области гуманитарного образования преподавались разнообразные курсы: этика и эстетика; атеизм и религия; основы инженерной экологии и др. Шла перестройка обучения инженеров в области экономики и организации с выработкой знаний и умений предпринимательской деятельности, менеджмента, маркетинга и других направлений обеспечения готовности к работе в условиях рынка.

На этом же заседании заслушивалась информация о приказе Госкомитета РСФСР по делам науки и высшей школы «О работе научного учреждения в условиях перехода к рыночной экономике». Докладчиками были ректор Ю.С. Васильев и проректор по научной работе А.К. Григорьев.

СПГТУ получил приказ Государственного комитета РСФСР по делам науки и высшей школы № 294 от 29 декабря 1990 года о работе научных учреждений в условиях перехода к рыночной экономике (в связи с переходом с 1 января 1991 года на новый механизм хозяйствования). В соответствии с этим приказом вузы должны были разработать временные положения о работе научных учреждений, руководствуясь типовым.

На своем заседании 25 февраля Ученый совет утвердил именные стипендии: имени Ленина — 20 стипендий, имени Капицы — 2, имени Кржижановского — 2, имени Павлова — 2 и Ученого совета — 7 [9, протокол № 2].

25 марта 1991 г. Слушался вопрос «О взаимодействии администрации и профсоюзной организации ЛГТУ по социальной защите сотрудников и студентов университета». Докладчиком выступал председатель профкома В.В. Бадалов.

Обсуждение этого вопроса вышло за рамки предложенной повестки дня. На самом деле встал вопрос о функциях Ученого совета на тот момент. Подписание коллективного договора между администрацией вуза и профкомом сотрудников в принципе включал все стороны социальной защиты сотрудников университета:

медицинское обслуживание, организацию питания, деятельность баз отдыха и лагерей и т. д. Выполнение коллективного договора в определенной степени контролировалось партийным комитетом и партийными организациями факультетов. Партийная организация ввиду определенной социально-политической обстановки отдалась от соучастия в управлении вузом, поэтому члены Ученого совета настаивали на расширении полномочий Совета в вопросах социальной защиты. Они приняли решения о создании комитета по социальной защите при Ученом совете. Члены Ученого совета требовали от администрации вуза обратиться в вышестоящие органы с информацией о трудном положении в вузе.

Речь шла также о социальной защите студентов. В марте 1991 года был заключен договор между администрацией ЛГТУ и профкомом студентов в соответствии с Законом СССР «О профессиональных союзах, правах и гарантиях их деятельности для защиты экономических и социальных интересов и прав студентов». В нем, в частности, было записано:

организовать при профкоме студентов университета фонд социальной помощи остронуждающимся студентам;

согласовывать все приказы и планы работ, касающиеся организации учебы, быта и досуга студентов, со студенческим профкомом;

не допускать исключения студентов университета без согласования с профкомом студентов (профбюро факультета) за исключением случаев академической задолжности;

предоставить возможность семейным студентам, имеющим детей, права обучения по индивидуальному графику в установленные сроки обучения в университете;

обеспечить льготным питанием студентов в течение учебного года и др. [Политехник, 25 апреля 1991, № 13].

Осенью 1991 года Минвуз практически не руководил высшими учебными заведениями. Действовало временное положение о вузах. В ЛГТУ, как и в других институтах и университетах, действовали Уставы, принятые в период существования советской власти, а ее уже фактически не было. Ленинградский Совет народных депутатов пытался в своей структуре создать некий орган типа отдела науки и учебных заведений обкома партии, который должен был управлять вузами и наукой в Ленинграде. Когда представители



Ленсовета пытались объявить о его создании на совещании руководителей вузов, инициатива провалилась [9, протокол № 3].

6 мая 1991 года. Служился вопрос «Утверждение плана мероприятий первоочередного характера и о бюджете ЛГТУ». Докладчики — ректор Ю.С. Васильев, проректор по научной работе А.К. Григорьев и председатель профкома сотрудников В.В. Бадалов.

Вуз большой, денег нет, поэтому на этом заседании Ученого совета и развернулась дискуссия главным образом о бюджете, что нашло отражение в принятом решении. В нем, в частности, отмечалось, что ректору необходимо обратиться в Государственный комитет по науке и высшей школе РСФСР с официальным письмом от имени Ученого совета по вопросу о выделении дополнительных средств на обеспечение социальной защиты профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников, учебно-вспомогательного состава, рабочих в соответствии с решением Совета Министров РСФСР о компенсации и повышении заработной платы. Считать необходимым перевод на контракт (договор) научных сотрудников тех структурных подразделений, которые нерентабельно вели длительную научно-исследовательскую работу и оплачиваются за счет других подразделений.

На этом же заседании обсуждался вопрос о **расширении связей ЛГТУ с КНР**. Политехнический институт в течение 45 лет развивал международные связи. После падения Берлинской стены в 1989 году, выхода стран Восточной Европы из социалистического лагеря и его распада международные связи с этими странами фактически прекратились. Ученый совет обсуждал возможности интернационализации международных контактов. Делегацию Политехнического университета, посетившую в тот период Китай, поразил факт сочетания сильной власти и рыночной экономики, страна была ориентирована и в политическом, и в экономическом плане на развитие сотрудничества с РСФСР. Ученый совет одобрил подписание двух договоров о сотрудничестве с вузами КНР [9, протокол № 4].

27 мая 1991 года. Обсуждается «Повышение качества подготовки специалистов без отрыва от производства на вечернем факультете технологии и автоматизации производства ЛГТУ и перспективы развития вечерней формы обучения». Докладчик — декан профессор В.А. Барилович.

Отмечалось, что на вечернем факультете готовились специалисты по 14 специальностям. В 1990 года был открыт прием на новые специальности: «Экономика управления производством» и «Международные экономические связи». С учетом потребностей промышленности и с целью трудоустройства молодых специалистов в 1991 году открылся прием по специальностям «Автоматизация технологических процессов и производств» и «Промышленное и гражданское строительство».

Члены Ученого совета были обеспокоены снижением качества подготовки специалистов на вечернем факультете, вызванное как изменениями, происходящими в промышленности, народном хозяйстве, так и контингентом студентов. В решении Ученый совет потребовал: ставить более жесткие требования к качеству подготовки специалистов; не снижать требования к преподаванию фундаментальных наук.

Еще один, чрезвычайно важный вопрос обсуждался на данном заседании: «О создании Союза студентов ЛГТУ». Инициативная группа студентов обратилась в ректорат с предложением — создать неполитическую организацию студентов университета. Дело в том, что комсомол как политическая молодежная организация перестал существовать. Районный комитет комсомола Калининского района, куда входила первичная комсомольская организация Политехнического университета, 26 декабря 1990 года объявил о распуске организации, и документы были уничтожены.

На факультетах стали формироваться студенческие организации, которые занимались формированием стройотрядов, проблемами в студенческих общежитиях и т. д. Они разработали Положение о Союзе студентов, программу. Союз студентов фактически брал на себя большинство функций комсомола, но неполитического характера. Поскольку число разных общественных организаций, имеющих политическую окраску или не имеющих, с определенными идеологическими установками, росло с каждым днем, Ученый совет принял положительное решение о создании Союза студентов ЛГТУ, но пока не включил эту организацию в Устав ЛГТУ.

Почти на каждом заседании Ученого совета стоял вопрос о материальной базе университета. Высшие учебные заведения практически не получали бюджетных средств на приобретение обо-

рудования, и поэтому оснащение учебных лабораторий производилось в основном за счет хозрасчетных работ. Объем хозрасчетных работ сокращался, что вызвано было резким сокращением средств у предприятий заказчиков, а также новой налоговой системой. Все это, несомненно, приводило к ухудшению качества подготовки специалистов. Оплата труда сотрудников была низкой. Работа в системе высшего образования переставала быть престижной. Способные выпускники не хотели оставаться на кафедрах, что вообще-то лишает вузы будущего.

27 мая 1991 г. Ученый совет своим решением обязал ректора Ю.С. Васильева письменно поставить в известность Комитет по делам науки и высшей школы РСФСР о том, что в этих условиях, при таком финансировании, которое выделялось, вуз находится под угрозой закрытия [9, протокол № 5].

Член Ученого совета проректор по научной работе, открывая традиционное собрание профессоров и преподавателей, посвященное началу учебного 1991 года, сказал: «Центральная проблема для вузов сегодня — это проблема выживания. Можно мечтать, планировать, но главное сегодня — выжить... То, что мы намечали делать завтра, надо делать именно сегодня. Министерские структуры повисли, как мокре белье на веревках, сами мечутся, ища спасения, поэтому надеяться можно только на себя, на нашу собранность и самоотверженную работу» [Политехник, 23 сентября 1991, № 20 (3030)].

30 сентября 1991 г. О завершении работы над Уставом ЛГТУ. Работа над Уставом университета началась еще в 1990 году на конференции вуза. (В период обсуждения Устава на заседании Совета вуз носил название — Ленинградский государственный технический университет. Утвержден Устав в 1992 году, когда вуз имел уже новое название — Санкт-Петербургский технический университет.) Это был первый устав, который обсуждался коллективом.

Обсуждение затянулось более чем на год, в это время появились новые нормативные документы. На местах, в высших учебных заведениях, появились разные структуры, не соответствующие традициям вуза, такие, как Совет трудового коллектива, Союз беспартийных, Совет докторов наук факультета и другие, которые стали претендовать на право управления вузом. В проекте Устава было зафиксировано суще-

ствование двух советов: Ученого совета вуза и Социально-экономического совета, которые должны быть объединены в один — Совет вуза.

Какие и сколько бы советов не создавалось, главное в руководстве вузом — это *управленческий профессионализм*.

После политического кризиса в стране, 19–21 августа 1991 года начался качественно новый этап политики российских властей. Главная задача Ученого совета в тот период — не потерять управление университетом. В этих условиях и начал рассматривать Ученый совет технического университета свой основной документ — Устав ЛГТУ. Завершил он эту работу на своем заседании в октябре, поэтому целесообразно проанализировать материалы этих двух заседаний [9, протокол № 6].

28 октября 1991 года. Утверждение Устава технического университета. На этом заседании Ученого совета Устав Ленинградского технического университета (ЛГТУ) был утвержден.

Впервые в наименовании вуза отсутствовало слово «государственный», хотя он таковым оставался. В преамбуле дана краткая историческая справка. В качестве основного документа, на основе которого действовал университет, в пункте 1.5 Устава было записано: «Университет функционирует как единый учебно-научно-производственный комплекс, объединяющий структурные подразделения на основе Закона РСФСР “О предприятиях и предпринимательской деятельности”». Больше никакого другого Закона не упоминалось.

В первом разделе Устава определялось, что «главной задачей университета является подготовка специалистов по созданию и эксплуатации новой техники, созданию новых технологий, материалов, методов управления. По разработке проблем физики, кибернетики, информатики и экономии на основе единства педагогической и научной деятельности при ориентации на научно-исследовательские институты». В более ранний период основной задачей вузов была подготовка специалистов для *народного хозяйства* <вид. автором>. Понятие «народного хозяйства» в новом Уставе отсутствовало.

Полномочия коллектива университета и общее руководство университетом осуществлял Ученый совет СПбТУ, число членов которого и общий порядок их избрания определялись кон-



ференцией коллектива университета [10, п. 8.2]. Ректор имел право ввести в состав Ученого совета в количестве 10 % от его числа проректоров, руководителей структурных подразделений, ученых и руководителей предприятий и организаций города. Предлагаемые ректором кандидатуры утверждались на заседании Ученого совета вуза. Студенты больше не входили в состав этого органа власти.

В Уставе подчеркивалось, что управление в университете его подразделениях осуществляется на основе сочетания *коллективного управления* (Ученый совет СПбГУ, ученые советы (советы) структурных подразделений) и *единоначалия* в лице руководителей (ректора, декана, заведующего кафедрой, начальника отдела и т. д.) в условиях гласности, выборности и отчетности.

Сочетание двух форм управления в университете основывалось на соблюдении субъектами управления следующих принципов:

решение органа управления, принятое в пределах его компетенции и в соответствии с Уставом СПбГУ, вступало в силу по приказу или указанию руководителя, изданному в течение двухнедельного срока после принятия решения;

ректор при несогласии с принятым решением Ученого совета вуза был вправе в двухнедельный срок возвратить решение со своими возражениями в Ученый совет для повторного обсуждения и голосования. Если же Ученый совет большинством в две трети голосов подтвердит ранее принятое решение, руководитель вуза реализует это решение.

Ученый совет университета мог потребовать при необходимости отмены или приостановки действия приказа ректора, а также потребовать внеочередного отчета ректора и на основании отчета рассмотреть вопрос о недоверии ректору. В то же время ректор вуза теперь не избирался, а назначался решением Государственного комитета РСФСР по делам науки и высшей школы по представлению Ученого совета (Устав СПбГУ 1991 г, п. 8.2).

Интересно, что выборы членов Ученого совета проводились в структурных подразделениях. Порядок и процедуру избрания определяли их ученые советы. Срок полномочий Ученого совета вуза — 5 лет.

Для ведения текущей работы Ученый совет СПбГУ создавал постоянные и временные комиссии по разным направлениям. На правах

постоянных были избраны советы: научно-методический, научно-технический, социально-экономический [10, разд. 8].

Устав был зарегистрирован в Министерстве науки, высшей школы и технической политики Российской Федерации 4 февраля 1992 года [10].

28 октября 1991 года. Обсуждался вопрос «О проведении предупредительной забастовки в поддержку требований учителей под лозунгом выполнения Указа № 1 Президента РФ Б.Н. Ельцина».

25 ноября 1991 года. Слушался вопрос «О реорганизации управления научно-исследовательскими и коммерческими подразделениями технического университета». Докладчик — проректор по научной работе А.К. Григорьев. Поданному вопросу приняты следующие решения [9, протоколы № 7, 8]:

1. Считать целесообразным развитие в Техническом университете новых экономических форм хозяйствования, таких, как арендные коллективы, малые и совместные предприятия и др.

2. Разработать и установить общий регламент деятельности коммерческих структур на основе следующий положений: коммерческие структуры должны способствовать повышению научно-технического потенциала кафедр, отделов и других подразделений Технического университета, совершенствованию учебного процесса, решению социальных задач коллектива.

Не допускать деятельности на территории Технического университета коммерческих структур, не оформивших с ним договорных отношений [9, протоколы № 7, 8].

В преддверии заседания Ученого совета вопрос функционирования в университете коммерческих структур в той или иной форме обсуждался на страницах газеты «Политехник».

Звучали предложения о развитии платных форм обучения, в том числе получения второго высшего образования, узкоспециальной подготовки, предоставления гражданам разнообразных возможностей удовлетворения их интеллектуальных потребностей [Политехник. 24 мая 1988. № 16].

С подобными предложениями обращались члены Ученого совета ЛГТУ в Госкомитет СССР по народному образованию. Его ответ был опубликован в газете «Политехник» 22 июня 1991 года, где подчеркивалось: «Что касается предложений о введении элементов платного обуче-

ния, то этот вопрос требует тщательной проработки на соответствие Основному Закону — Конституции СССР».

10 декабря 1991 года. Слушался вопрос «О ряде событий, произошедших 8 декабря 1991 года». Докладывал ректор университета член-корреспондент РАН Ю.С. Васильев. Это было внеочередное заседание Ученого совета ЛГТУ, вызванное произошедшим историческим событием.

8 декабря 1991 года Председатель Верховного Совета Республики Беларусь С.С. Шушкевич, Президент РСФСР Б.Н. Ельцин, Президент Украины Л.М. Кравчук в местечке Белая Вежа под Минском подписали «Соглашение о создании Содружества Независимых Государств», в преамбуле которого заявлялось, что «Союз ССР как объект международного права и geopolитическая реальность прекращает свое существование». Кроме того, подчеркивалось, что с момента заключения Соглашения на территориях подписавших его государств не допускается применение норм бывшего СССР. Деятельность органов Союза ССР прекращается. Гарантируется выполнение международных обязательств, вытекающих из договоров и соглашений, подписанных СССР.

В своем решении Ученый совет ЛГТУ отметил: в служебной переписке теперь не употреблять «СССР» и направлять документы, обращения и т. д. во властные структуры Российской Федерации (России) [9, протокол № 9].

28 декабря 1991 года. Слушался доклад «О прекращении существования СССР» ректора университета члена-корреспондента РАН Ю.С. Васильева. 23 декабря 1991 года во время встречи М.С. Горбачева и Б.Н. Ельцина были обсуждены вопросы, связанные с прекращением деятельности союзных структур. 25 декабря 1991 года М.С. Горбачев сложил с себя полномочия Президента СССР. И в тот же день, 25 декабря, Верховный Совет РСФСР утвердил новое название республики — Российская Федерация (Россия). Россия становится правопреемником СССР по всем вопросам международной деятельности. Символика СССР на территории Российской Федерации изменилась на новую.

В связи с этим Ученый совет постановил:

1. Рекомендовать руководителям структурных подразделений обратить внимание на наглядную агитацию, праздничные украшения

(флаги, плакаты) и другие материалы, в которых используется символика СССР, и при необходимости заменить ее на символику Российской Федерации.

2. Рекомендовать деканам факультетов и заведующим кафедрами вести разъяснительную работу со студентами о произошедших изменениях.

Рекомендовать ректорату университета обратиться в Министерство науки, высшей школы и технической политики России за разъяснением статуса студентов, аспирантов, стажеров, имеющих постоянное место жительства в других странах Содружества Независимых Государств [9, протокол № 10].

28 декабря 1991 года. Обсуждался вопрос «О переводе на баланс вуза перспективных структурных подразделений университета, обеспечивающих работу Технического университета и связанных с ним организаций». Шла речь о работе книжного магазина, столовых, буфетов и т. д. Ученый совет полностью согласился с предложением ректората [9, протокол № 10].

Для формирования экономической политики университета, а также обеспечения социальной защиты сотрудников Ученый совет организовал постоянно действующий социально-экономический совет. В его состав вошли: заведующий кафедрой ЭлМФ Г.Н. Александров, доцент ФТК Л.В. Бабко, декан ММФ А.Я. Башкарев, декан ФТК В.Д. Ефремов, доцент ФМетФ Б.Д. Курников, заведующий кафедрой ММФ Ю.К. Михайлов, заведующий кафедрой ФТК И.М. Семенов, научный сотрудник РФФ В.И. Смирнов, главный бухгалтер университета А.С. Смирнова, заведующий кафедрой РФФ И.А. Цикин, профессор ГПС С.Л. Чечурин [14].

С конца декабря 1991 года начинается новая история современной России, когда в результате глубокого социально-экономического и политического кризиса прекратил свое существование СССР.

Еще в октябре 1991 года на V-м Съезде народных депутатов Б.Н. Ельцин заявил, что начался момент для перехода к решительному реформированию экономики. Акцент делался на ускоренное формирование собственников. Эти реформы начались с «шоковой терапии».

В результате либерализации цен произошел невиданный рост цен. В течение одного 1992 года цены подскочили в 36 раз. Многократно снизи-



лась зарплата у бюджетных работников. По данным Российской академии наук к концу 1993 года слой богатых в стране составил 3–5 %, среднеобеспеченных — 13–15 %, бедных — 40 %, живших за чертой бедности — 40 %. Например, академик РАН в 1992 году получал денег меньше, чем московский дворник [Новейшая история Отечества. XX век: Учеб. для вузов. — М., 1999. — С. 393]. По данным канадской журналистки Н. Клейн, в Российской Федерации в 1989 году насчитывалось 2 миллиона бедных (*скорее всего, речь шла о СССР, а не только о РФ* <выделено автором>). По данным Всемирного банка к середине 90-х годов в стране проживало 74 миллиона нищих людей. За 8 лет обнищало 72 миллиона [11].

Закрылись многие НИИ, лаборатории, резко ухудшилось материальное положение ученых и преподавателей. Виртуальный в советский период «безработный» стал угрожающей реальностью. Это стало основной причиной оттока ученых и преподавателей высшей школы в коммерцию или заграницу. Только в 1992 году в коммерцию ушли 90 тысяч ученых. Численность научно-педагогических работников сократилась на 27 % [12, с. 393]. Интеллигенция и служащие (так называемый средний класс советской эпохи), проголосовавшие за демократию и рынок, не стали классом собственников ни тогда, в 90-е годы, ни значительно позже.

Проблема ежедневного выживания стояла очень остро и в СПбГПУ того времени. Об этом можно судить по вопросам и проблемам, которые были предметом обсуждения на заседаниях Ученого совета в 1993 году, да и значительно позже.

Первое заседание Ученого совета 1993 года 25 января было посвящено рассмотрению вопроса «Ореорганизации Научно-исследовательской части в Научно-производственный комплекс государственного технического университета». С докладом выступал проректор по научной работе профессор А.К. Григорьев. Предложение о реорганизации научной части в научно-производственный комплекс было одобрено. В целях развития фундаментальных и поисковых научных исследований в вузе Ученый совет принял решение о создании Фонда поддержки науки в СПбГПУ.

22 февраля 1993 года. Ученый совет рассматривал вопрос «Использование электромеханическим и физико-механическим факультетами

международного сотрудничества для совершенствования учебного процесса и развития научных обменов с зарубежными партнерами в новых экономических условиях». С докладами выступали деканы факультетов профессора В.В. Попов и В.А. Пальмов. СПбГПУ традиционно имел и развивал различные формы сотрудничества с зарубежными фирмами, вузами и ведущими учеными. В доперестроечные времена, т. е. в советский период до 1985 года, международное сотрудничество осуществлялось в основном с социалистическими странами. Сотрудничество проводилось на основе договоров между вузами и дополнительными соглашениями между кафедрами и факультетами.

После раз渲ала СССР формы сотрудничества преобразовались, стали возникать новые связи и формы сотрудничества. Более значительную роль стали играть соглашения о сотрудничестве, заключаемые факультетами и их ведущими учеными. Личные контакты стали играть значительную роль. Наибольшую активность проявляли в тот период профессора: Г.Н. Александров, Ю.С. Васильев, В.Н. Боронин, В.Р. Окороков, В.А. Пальмов, Г.А. Шнеерсон, М.П. Федоров и др.

Международные контакты решали задачи, ориентированные на повышение качества обучения и рейтинга университета.

Одной из форм международного сотрудничества является обучение иностранных студентов, стажеров, аспирантов на коммерческой основе. На электромеханическом факультете, например, традиционно обучался большой контингент студентов и аспирантов. Так, в конце 70-х и начале 80-х годов иностранный студенческий контингент на ЭлМФ составлял 250 человек. В конце 80-х — 180 чел, в 1993 году — 135 человек из 41 страны, главным образом — Азии и Африки.

Имелся положительный опыт работы выпускников Технического университета за рубежом не только в связи с их выездом на постоянное место жительства, но и на контрактной основе. Например, в Бразилии работал доктор технических наук профессор Г.В. Подпоркин, в Австралии — доцент Ю.В. Макаров. С лекциям в КНР, США, ФРГ выступали академики В.А. Глухих и Н.Н. Тиходеев, член-корреспондент РАН Г.Н. Александров, профессора Г.М. Павлов, Г.А. Шнеерсон, С.В. Дресвин, В.В. Попов, С.В. Смоловик и другие [13, протокол № 2].

Ученый совет одобрил работу факультетов по международной деятельности. Своим решением Ученый совет обязал проректора по международным связям организовать в университете систему дополнительных курсов (госбюджетных и хозрасчетных) по языковой, компьютерной, управлению, математической подготовке специалистов на иностранных языках с целью обеспечения наиболее подготовленным студентам лучших возможностей по трудоустройству в сфере международного сотрудничества.

26 апреля 1993 года рассмотрен вопрос «О подготовке специалистов в рамках многоуровневой системы высшего инженерно-технического образования». С докладами выступали ректор Ю.С. Васильев и проректор по учебной работе В.Н. Бусурин. Было отмечено, что в рамках развития вуза как технического университета на восьми факультетах обучение осуществлялось по многоуровневой структуре высшего технического образования, ориентированной на выпуск дипломированных инженеров и магистров с присвоением после четырех лет обучения диплома бакалавра наук. Обучение велось на основе новых учебных планов, в основу которых положены требования высшего базового образования, реализующие концепцию профессионального обучения на основе широкого фундаментального и гуманитарного образования.

Переход на новую систему обучения потребовал развития системы повышения квалификации преподавателей по основным естественно-научным, гуманитарным и общетехническим дисциплинам и современным методам преподавания, прежде всего для молодых преподавателей.

На этом же заседании было рассмотрено Временное положение о конкурсном отборе профессорско-преподавательского состава для заключения с ними контракта. Все дело в том, что между принятым Законом об образовании и КЗОТом существовали противоречия, а начиная с конца 1992 года у многих преподавателей истекал срок избрания по конкурсу. Поэтому Ученый совет университета принял Временное положение, в котором, в частности, подчеркивалось, что образующиеся вакантные должности подтверждаются приказом по вузу на основании представлений деканов факультетов, директора Псковского филиала и руководителей центров. Объявления в печати отменяются. Принятие та-

кого документа свидетельствовало, что одно время уходило, а другое еще не пришло.

В связи с принятием Закона «Об образовании» от 10 июня 1992 года и отсутствием в нем ряда положений, связанных с вопросом избрания руководителей — ректора, деканов и т. д., были внесены уточнения в VIII-й раздел Устава университета — «Управление СПбГПУ». Все изменения касались вопросов пролонгации срока пребывания в должности ректора и других руководителей вуза. А еще обращалось внимание на то, что Ученый совет выражает интересы всего коллектива, так как избирается в структурных подразделениях. Это — чтобы не появились советы трудовых коллективов [13, протокол № 4].

24 мая 1993 года на заседании Ученого совета стоял главный вопрос — избрание ректора и рекомендации Госкомитету по высшему образованию РФ по заключению контракта с ректором. Действующий ректор университета Ю.С. Васильев был избран в 1988 году сроком на 5 лет. *То есть он избирался еще в советский период, когда влияние партийных органов было велико, а переизбрание шло уже совсем в другую эпоху, хотя тогда это реально мало кто осознавал. Позади уже был «путч» 1991 года, а впереди — октябрь 1993 года <авт.>.*

В Законе «Об образовании» и других документах того периода (проект о высшей школе) вопрос об избрании трактовался неоднозначно. Употреблялись такие формулировки, как переизбрание, выдвижение, продление полномочий, продление контракта. Поэтому Ученый совет принял решение: вопрос, вынесенный на обсуждение, разделить на два — сначала провести избрание ректора, а затем принять рекомендации Госкомитету по высшему образованию РФ.

Слово для доклада было предоставлено Юрию Сергеевичу Васильеву, который сказал, что за прошедшие 5 лет менялась линия поведения не только ректора, но и всего профессорско-преподавательского состава, студентов, служащих и рабочих. Демократизацию в учебных и научных процессах и административной деятельности почувствовали все. Факультеты и структурные подразделения выполняли целевую установку — выживание вуза при разрушении целевого финансирования.

Начало пятилетия было сопряжено с обнадеживающими намерениями. Два года перестрой-



ки проходили в СПбТУ под эгидой создания генерального плана развития вуза. Затрачен колоссальный труд сотрудников вуза. Однако план, который был разработан и утвержден, оказался документом, лежащим на полке. Деятельность нашего университета в 1992–1993 годах невозможно рассматривать в отрыве от социально-экономических процессов, которые происходили в нашей стране и носили обвальный характер. В 1993 году на волне политизации общества произошла смена руководства страны, что существенным образом сказалось на социально-экономическом положении высшей школы, ее работе.

Ряд ранее союзного подчинения вузов подключили к российской системе высшего образования. Это нанесло определенный урон с точки зрения финансирования бывших вузов системы Минвуза СССР. Фактически финансирование стало порционным и в целом сократилось.

Распалась система планового распределения молодых специалистов. Из-за низкой востребованности со стороны промышленности университет пошел на сокращение приема в вуз. Сократилось число иногородних студентов.

Разрушена система производственной практики, что естественно приводило к снижению качества подготовки специалистов. Остро стояли вопросы стипендий, общежитий, платы за обучение и проживание и т. д.

Много времени Ю.С. Васильев посвятил научной работе в университете. Здесь нет необходимости раскрывать этот вопрос, потому что об этом много было сказано выше.

Члены Ученого совета в своих выступлениях отмечали, что прошедшие пять лет были похожи на плавание по бушующему океану, в котором университет очень резко бросало. Приходилось нередко менять курс, но университет не только выжил, выстоял, не утратил своих позиций, но и приумножил их. Все выступающие отметили, что в этом большая заслуга Ю.С. Васильева, который умел слушать, слышать и как крупный ученый, известный не только в России, но и за рубежом, умел выбирать правильный курс. Его мудрость поражала многих. Иногда казалось — ситуация безвыходная, но он находил решение. Ученый совет единогласно проголосовал за избрание ректором СПбГТУ Ю.С. Васильева на

следующие 5 лет. Вопрос о рекомендации Госкомитету по высшему образованию РФ о заключении контракта с ректором перенесен был на следующий совет.

В 1993 году по всей стране широко обсуждался проект Конституции РФ. По поручению председателя Ученого совета была сформирована делегация университета, которая принимала участие в мероприятиях под названием «Обсуждение учеными Санкт-Петербурга проекта Конституции России». Член этой комиссии М.М. Козлов докладывал Ученому совету о деятельности преподавателей в подобных мероприятиях, о том, как и что приходится отстаивать, чтобы в ст.43 было в любой форме зафиксировано право граждан получать бесплатное высшее образование [13, протокол № 5].

С началом перестройки, особенно в 90-е годы, предпринимательство стало рассматриваться как спасение, способ выживания, а не способ получать какую-то сверхприбыль. Поэтому на заседаниях Ученого совета СПбГТУ довольно часто рассматривались вопросы, связанные с коммерцией и предпринимательством.

21 июня 1993 года. На этом заседании предметом обсуждения стала предпринимательско-комерческая деятельность структур при СПбГТУ, в том числе и студенческих коммерческих предприятий. С докладами и сообщениями выступали проректор по учебной работе В.Н. Бусурин, председатель профсоюзного комитета студентов К.В. Щвецов, председатель союза студентов В.В. Поляпун. В докладах и выступлениях членов Ученого совета было отмечено, что деятельность предпринимательских, коммерческих структур (а их было 64) играет определенную положительную роль в материальной поддержке сотрудников университета, способствует сохранению в университете высококвалифицированных сотрудников. Значительная часть средств, поступающих от коммерческих структур, шла на развитие материально-технической базы вуза.

Деятельность коммерческих структур при СПбГТУ Ученый совет рассматривал постоянно, поскольку это было связано с проблемой выживания университета [13, протокол № 6].

В 1993 году состоялись выборы ректора Технического университета — профессора доктора технических наук члена-корреспондента РАН Ю.С. Васильева. В связи с этим **21 июня 1993 года**

было принято очень интересное решение Ученого совета, которое так и называлось: «Решение Ученого совета в связи с избранием ректора и рекомендаций <выделено автором> Госкомитету по высшему образованию Российской Федерации по заключению контракта с ректором». В этом документе отмечалось, что резкое сокращение целевого финансирования высшей школы и снижение уровня жизни преподавателей, студентов, научных работников потребовали от ректора и администрации Технического университета создания и реализации программы выживания вуза; его адаптации к непрерывно меняющимся условиям функционирования; учета протекающих процессов демократизации и расширения самостоятельности; поддержки инициатив структурных подразделений, членов Ученого совета, студентов.

Наиболее важными Ученый совет считал следующие мероприятия, которые были предприняты для поддержания высокого рейтинга вуза и сохранения его научно-технических школ:

получение бывшим Политехническим институтом статуса Государственного технического университета (ГТУ), разработка и принятие Устава, укрепление роли Ученого совета в управлении вузом;

усиленное внимание к профессорско-преподавательским кадрам, ученым вуза, создание системы материального поощрения за выполнение научной, методической и организационной работы;

переход на многоуровневую систему подготовки специалистов, учет потребностей рынка труда по количеству выпускников и их специ-

альностям, выход на международный рынок подготовки кадров;

качественное изменение структуры подготовки, открытие новых специальностей, создание новых групп, в том числе по маркетингу и менеджменту;

обеспечение повышения квалификации и переподготовки кадров для Санкт-Петербурга и его региона;

поиск и отработка новых путей социально-экономического развития ГТУ и сохранение его кадров;

реорганизация научно-исследовательской части;

поддержка инициатив ученых, преподавателей, научных сотрудников университета, представление большей самостоятельности его структурным подразделениям;

расширение контактов с различными организациями внутри России и за рубежом.

В то, что Технический университет продолжает успешно функционировать, весомый вклад внес член-корреспондент РАН Ю.С. Васильев. Ученый совет СПбГТУ фактически рекомендовал Госкомитету по высшему образованию Российской Федерации учесть все это при заключении контракта с избранным ректором Ю.С. Васильевым [13, протокол № 6].

Такого в истории Ученого совета еще не было — чтобы он давал какие-то рекомендации вышестоящему органу. В то же время это свидетельствовало, что Ученый совет стал высшим органом управления в вузе, принимал решения и брал ответственность за них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закон РФ «Об образовании» от 10 июля 1992.— № 3266-1
2. Смелов, В.А. Политехнический институт. Тридцатые годы [Текст] / В.А. Смелов.— СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2008.— С. 6, 7, 56, 183, 209.
3. Устав Ленинградского индустриального института [Текст] / Утв. Всесоюзным Комитетом по делам высшей школы при СНК СССР 29 мая 1939 г.— Приказ №У/298.— С. 27–28.
4. Положение о совете высшего учебного заведения от 30 октября 1961, № 303 // Высшая школа. Сб. основных постановлений, приказов и инструкций [Текст]: в 2-х ч. / Под ред. Е.И. Войленко.— М.: Высшая школа, 1978.— Часть 1. С. 71–72.
5. Яковлев, А.Н. / Избранные интервью: 1992–2005 [Текст] / А.Н. Яковлев.— М.: МФД, 2009. С. 309, 338.
6. О первоочередных мерах по расширению участия студентов, аспирантов, молодых ученых и специаистов в управлении вузами [Текст] // Политехник. 1 марта, 1988.— № 6.
7. Современно — значит с мыслью о будущем [Текст] // Политехник. 25 мая 1988.— № 19.
8. Итоги расширенного заседания Ученого совета [Текст] // Политехник. 5 октября 1988.— № 27.
9. Стенограммы заседания Ученого совета ЛГТУ [Текст].— Архив Ученого совета СПбГПУ.— 1991.— Протоколы № 1 (28 января), № 2 (25 февраля), № 3 (25 марта), № 4 (6 мая), № 5 (27 мая),



№ 6 (30 сентября), № 7 (28 октября), № 8 (25 ноября), № 9 (10 декабря), № 10 (28 декабря).

10. Устав Санкт-Петербургского технического университета [Текст] / Утв. Ученым советом СПбГПУ 28 октября 1991 г.— Зарегистр. в Министерстве науки, высшей школы и технической политики РФ 4 февраля 1992 г. № рег. 88/103, п. 8.2.

11. Клейн, Н. Шоковая терапия. Восхождение капитализма катастроф [Текст] / Н. Клейн // Литературная газета.— 2008. 13–19 февраля. № 6 (6158).

12. Новейшая история Отечества. XX век [Текст]: Учеб. для студ. вузов / Под редакц. А.Ф. Киселева, Э.М. Щагина.— М.: Гуманит. изд. центр ВЛАДОС, 1999.— Т. 2.— С. 393.

13. Стенограммы заседаний Ученого совета ЛГТУ [Текст].— Архив Ученого совета СПбГПУ.— 1993.— Протоколы № 2 (22 февраля), № 4 (26 апреля), № 5 (24 мая), № 6 (21 июня).

14. Новый Совет [Текст] // Политехник, 1992, 25 февраля.

УДК 629.78

B.A. Лопота

КОСМОНАВТИКА И ХХI ВЕК

По материалам доклада президента РКК «Энергия» им. С.П. Королёва на выездном заседании Президиума РАН 13 апреля 2011 года

РКК «Энергия» в истории ракетно-космической техники

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия») заложила основы многих направлений ракетной техники и практической космонавтики. Это и стратегические ракетные комплексы, и ракетные комплексы космического назначения — средства выведения, и научные спутники, спутники связи и наблюдения, и орбитальные станции, пилотируемые и грузовые космические корабли.

На предприятии, которое основано в 1946 году академиком С.П. Королевым и до 1966 года было известно как Особое конструкторское бюро-1 (ОКБ-1), а в последствии — ЦКБЭМ и НПО «Энергия», в середине 1940-х–1960-х годах принимались все ключевые научно-технические решения по созданию ракетно-ядерного щита страны и освоению космического пространства. Здесь была создана, сохранена и в настоящее время динамично развивается научно-техническая школа творцов передовой ракетно-космической техники, связанная с именем Сергея Павловича Королева.

Ни одна организация отечественной ракетно-космической промышленности не сделала для обороноспособности страны в 1950–1960-е годы больше, чем ОКБ-1 со своей кооперацией: на вооружение были поставлены 11 ракетных

комплексов. На предприятии были созданы средства выведения в космос различных полезных грузов, в их числе основанное на «великолепной семерке» — межконтинентальной баллистической ракете Р-7 — знаменитое семейство ракет-носителей (РН) среднего класса «Спутник», «Восток», «Восход», «Молния», «Союз», которые созданы совместно с филиалом № 3 ОКБ-1 в г. Самара. Здесь также и РН сверхтяжелого класса (РН Н1 и РН «Энергия» многоразовой космической системы «Энергия-Буран»), и разгонные блоки типа ДМ. При участии корпорации создана РН среднего класса «Зенит-3SL» комплекса морского базирования «Морской старт». Сегодня РН типа «Союз», «Зенит-3SL» и разгонные блоки типа ДМ по надежности и точности являются одними из лучших в мире и обеспечивают доставку на околоземные орбиты многих космических аппаратов по государственным и коммерческим программам.

РН Н1 высотой 105 м и грузоподъемностью 90 т (при стартовой массе 2820 т) была основной в отечественной лунной программе «Н1 — Л3», в реализации которой наша страна, к сожалению, проиграла по темпам американцам, в результате чего было принято политическое решение о ее закрытии. Следует отметить, что современные разгонные блоки типа ДМ берут свое начало в программе «Н1 — Л3».

В настоящее время одним из основных направлений деятельности РКК «Энергия» является пилотируемая космонавтика. И здесь большое внимание уделяется работам по программе «Международная космическая станция» (МКС) — созданию космических кораблей типа «Союз», «Прогресс», российских модулей станции и их полетам. Полувековые наработки и достижения по этому направлению, начатому 12 апреля 1961 года космическим полетом Ю.А. Гагарина — первым полетом человека в космос, позволили международному сообществу перейти в конце XX столетия к новому этапу развития мировой пилотируемой космонавтики — этапу широкого сотрудничества различных стран мира. В 1990-е годы, в тяжелейшее время для экономики нашей страны, были реализованы такие крупные проекты, как «Мир» — «Шаттл», «Мир» — «НАСА». На их базе в 1998 году была начата реализация проекта «МКС», который благодаря государственной поддержке США, России, стран ЕКА, Канады, Японии оказался самым амбициозным проектом международного сотрудничества в околосолнечном космическом пространстве. Эти три проекта стали спустя два десятилетия продолжением первой экспериментальной международной космической программы «Аполлон — Союз», осуществленной в 1975 году.

Другое важное направление деятельности РКК «Энергия» — автоматические космические аппараты (КА). Нашей организацией созданы: первый в мире искусственный спутник Земли, первые КА для исследования космического пространства, первые межпланетные станции для облета Луны и посадки на ее поверхность, межпланетные станции для исследования Марса, Венеры, первые отечественные спутники специального назначения — связи «Молния-1» и наблюдения «Зенит». Осуществив прорывы по ряду направлений космической техники, наше предприятие во главе с С.П. Королевым в 1960—1970-е годы обеспечило решение важнейших для страны задач в области ракетной и космической техники. Королевское ОКБ-1 было не только лидером разработки новых технологий, но и сыграло ключевую роль в формировании кадрового и научно-производственного потенциала отрасли. Заместители Сергея Павловича и ведущие специалисты ОКБ-1 вместе с технической документацией направлялись обеспечивать развертывание серийного производства и проведение новых

разработок в филиалы ОКБ-1, в другие организации и на заводы страны: филиал № 3 — впоследствии ЦСКБ с заводом «Прогресс» в Самаре; СКБ с заводом № 385 в Миассе на Урале — в настоящее время РКЦ им. В.П. Макеева, филиал № 10/ОКБ-10 в Красноярске — сегодня ИСС им. М.В. Решетнева, и т. д.

В 1990-х годах РКК «Энергия», проанализировав состояние отечественного и зарубежного спутникостроения, вернулась к созданию автоматических КА. Впервые в нашей стране была создана отечественная негерметичная универсальная космическая платформа, отвечающая уровню лучших мировых образцов. Были приглашены многие предприятия отрасли к созданию на ее основе специализированных автоматических КА нового поколения. Но полномасштабное развертывание этого направления не состоялось. РКК «Энергия» в качестве пилотного проекта продемонстрировала разработку спутников связи «Ямал». Спутники работают сегодня на геостационарной орбите с беспрецедентным для отечественных аналогов сроком активного существования (более 11 лет — «Ямал-100»). В настоящее время корпорация выполняет заказы иностранных заказчиков по созданию спутников связи и дистанционного зондирования Земли на основе этой платформы, прошедшей серьезную летную сертификацию.

РКК «Энергия» на современном этапе пилотируемой космонавтики

Пилотируемая космонавтика остается сегодня ключевым направлением деятельности корпорации, служа научно-технической базой создания и отработки новых космических технологий, которые могут быть востребованы и при создании автоматических КА различного назначения. В программах пилотируемой космонавтики нет права на ошибку. Поэтому здесь строжайшие требования к достоверности получаемой информации на всех этапах разработки, производства, испытаний и эксплуатации, в том числе к надежности и безопасности всех систем. Постоянный и неослабный контроль исполнения этих требований — основной принцип пилотируемой космонавтики, заложенный С.П. Королевым.

В начале текущего столетия главные цели отечественной космонавтики — обеспечение национальной безопасности и технологической



независимости России, рост благосостояния ее граждан. На достижение этих целей направлены решения задач постоянного и беспрепятственного доступа российских космических средств различного целевого назначения в космос; обеспечения безопасности полетов, включая возвращение спускаемых аппаратов на Землю; поддержки территориальных ресурсных интересов; соблюдения престижа государства; развития космических технологий; генерации знаний. Особо важная задача (задача поколений) — сохранить и развивать научный и инженерный высококомпетентный потенциал нации. Один из путей ее решения — разработка и выпуск новых учебных пособий, учебников, методических и научно-популярных материалов.

Проект «МКС» — образец крупнейшей в мире международной кооперации. Партнерами вложено в него уже около 120 млрд долл. Идея создания МКС была рождена совместными усилиями специалистов России и США. Проект, находящийся с 1998 года в стадии практического осуществления, достиг высокого уровня развития. Уникальная станция с габаритными размерами 126×70 м может функционировать и в пилотируемом, и в автоматическом режимах. Космонавты и астронавты стран-партнеров проводят на ее

борту значительное количество экспериментов и исследований.

В предстоящие 5–10 лет планируется дальнейшее развитие российского сегмента (РС) МКС (рис. 1). Энергетика сегмента сегодня характеризуется мощностью вырабатываемой электроэнергии порядка 5–5,5 кВт. При необходимости дополнительную электроэнергию РС получает от американского сегмента. Практика строгого разграничения по тем или иным ресурсам стран-партнеров на станции сегодня не применяется. Работа в проекте идет по принципу «все в одной лодке»: взаимопомощь космонавтов и астронавтов, обеспечение выполнения исследований и экспериментов, психологические взаимоотношения и другие вопросы по обеспечению жизнедеятельности объединенных экипажей МКС на орбите находятся в центре внимания всех участников проекта.

Главная задача РС МКС — выполнение отечественной программы научно-прикладных исследований. На внешней поверхности РС и в его гермоотсеках организованы универсальные рабочие места. На служебном модуле «Звезда» в специальных зонах размещается исследовательская аппаратура, здесь имеются все необходимые интерфейсы. По сути, можно подключить

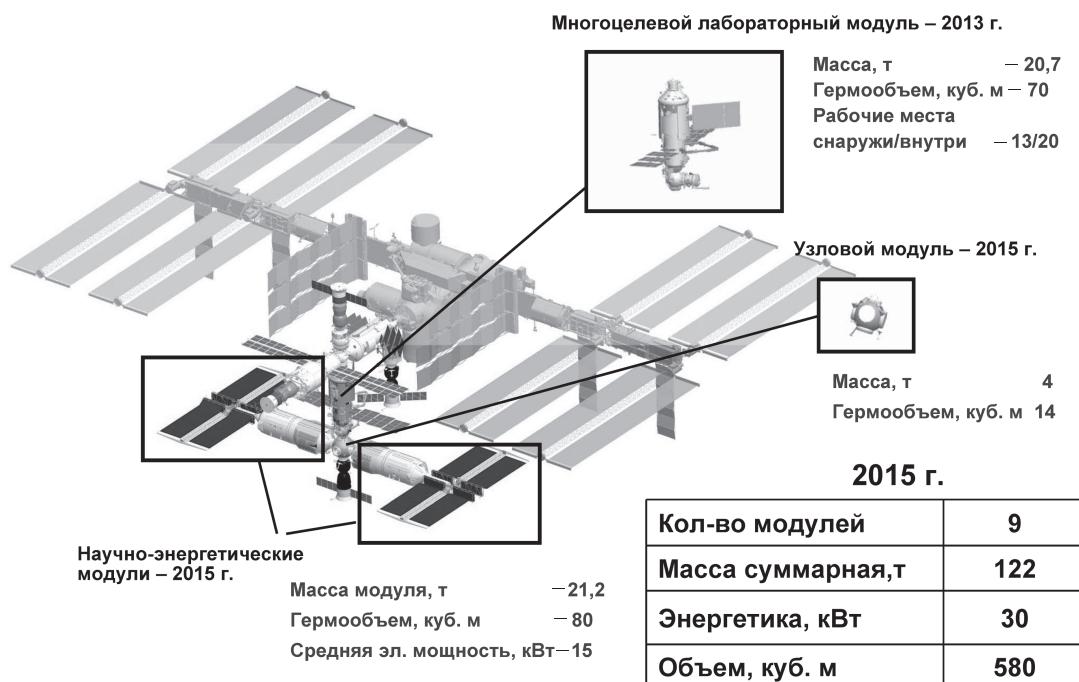


Рис. 1. Развитие российского сегмента Международной космической станции

любую современную аппаратуру и проводить исследования. В качестве автономных платформ также используются транспортные грузовые корабли «Прогресс» — после их работы в составе станции.

С международными партнерами имеется договоренность о том, что аппаратура, находящаяся на РС МКС, может применяться для реализации любых идей. Перечень такого оборудования доступен для всех: он размещен на сайте РКК «Энергия», но если необходимо, можно сформировать дополнительный документ и распространить среди ученых, чтобы они знали об этих возможностях при разработке идей, которые предлагаются реализовать на орбите.

На малом исследовательском модуле «Рассвет» расположено восемь рабочих мест, оснащенных универсальными интерфейсами. Аппаратура, необходимое оборудование и расходные материалы для исследований доставляются на МКС в каждом грузовом корабле. Самый большой ресурс для отечественной науки будет предоставлен, когда в состав станции войдет российский многоцелевой лабораторный модуль «Наука». На нем предусмотрено 33 рабочих места (13 — на наружной поверхности, 20 — в гермоотсеке). Одним словом, появится полноценная исследовательская лаборатория. Начало ее работы предполагается в первой половине 2013 года.

Сегодня более 40 организаций России — участники работ по российской программе исследований и экспериментов. Количество наименований этих работ — около 200. Желательно, чтобы и далее эта программа наращивалась по объему и качеству работ, в том числе по исследованию Солнечной системы, астрофизике и др.

Следует выделить проблему, с которой мы сталкиваемся постоянно. В стране практически разрушена приборная промышленность, что отражается на возможности изготовления высокотехнологичных научных приборов и оборудования, необходимых для научной программы исследований и экспериментов на МКС. Утеряны кадры и технологии сертификации таких приборов для космических условий: из всей номенклатуры приборов около 70 % не могут пройти наземные испытания для того, чтобы они удовлетворяли требованиям, отвечающим их применению на борту станции. И это при возможности оперативной доставки приборов на МКС:

ежегодно к ней стартуют пять-шесть грузовых кораблей «Прогресс», в грузовом отсеке каждого из которых размещается оборудование, аппаратура, расходные материалы суммарной массой около 600 кг, причем научное оборудование может занимать до 50–60 %.

В рамках российской программы научных экспериментов и исследований по программе МКС можно, например, провести многофункциональный эксперимент с крупногабаритными антеннами. При использовании таких антенн открываются огромные перспективы в области телекоммуникации и радиометрии. Крайне актуальна задача по созданию в космосе антенн диаметром 20–30 м и более. Нужно либо изготавливать такие антенны на Земле и иметь технические устройства по приведению их в рабочую конфигурацию на орбите, либо иметь на борту корабля соответствующие материалы и технологии, которые позволяют создавать антенные конструкции непосредственно в полете. Над созданием подобных конструкций работают многие зарубежные и российские специалисты.

Вместе с тем следует отметить, что существенно сократилось число российских организаций, которые занимаются космическими исследованиями материалов и биопрепараторов в условиях микрогравитации. Это направление закрепилось в настоящее время в основном за американскими и японскими коллегами, хотя на борту РС МКС и при автономных полетах грузовых кораблей есть все возможности для аналогичных работ.

В истории нашей страны максимально эффективные результаты ракетно-космическая отрасль имела, когда решала общие задачи совместно с Академией наук. Так было во времена С.П. Королева и М.В. Келдыша. Сотрудничество должно быть восстановлено, ему необходим новый импульс развития, в том числе при решении ряда прикладных задач, например при обеспечении возвращения КА с околоземной орбиты. Известно, что спуск аппарата в атмосферу Земли сопровождается разогревом его поверхности до температуры примерно 2300–2500 °C. Время спуска составляет примерно 7–7,5 мин. При создании транспортного пилотируемого корабля нового поколения, проект которого поручено выполнить РКК «Энергия», необходимо решить ответственную задачу по защите конструкции возвращаемого на Землю аппарата и обеспече-



нию безопасности его экипажа. Для этого требуются легкие теплозащитные покрытия, еще более эффективные, чем имеющиеся.

Новый корабль (рис. 2) по объему будет значительно больше «Союза». Численность его экипажа — до шести человек. В проекте более точная система приземления — комбинация парашютно-реактивных методов посадки с использованием трехкупольной парашютной системы. Сегодня точность посадки спускаемых аппаратов кораблей типа «Союз» соответствует кругу радиусом 13 км. Для нового корабля стоит задача обеспечить приземление его возвращаемого аппарата (ВА) с возможным разбросом не более 2,5 км по радиусу относительно точки прицеливания. Это особенно важно при старте с нового космодрома России «Восточный». В данном случае по сравнению с космодромом «Байконур» условия приземления ВА более сложные (сопки, лес) и районов для обеспечения его посадки всего четыре.

О ракетных технологиях

В области ракетного двигателестроения, особенно в свете задач создания перспективных средств выведения, огромную роль сыграли

академик В.П. Глушко и его ученик академик Б.И. Каторгин. Под их руководством в 1978 году были проведены испытания жидкостного ракетного двигателя с тягой около 800 т.

С точки зрения реализации в ракетных двигателях возможностей химической энергетики сделано очень многое. А вот в области создания легких надежных конструкций РН или ракет космического назначения (РКН) — непочатый край работы. Необходимо обеспечить более высокую удельную массу конструкций РКН, геометрическую термостабильность, высокое качество и точность изготовления, плотность компоновок. Следует продолжить разработку ракетных средств многоразового применения, перспективных двигательных установок, в том числе работающих в космосе с многократным включением.

Отдельная тема — уровень организации производства в ракетно-космической отрасли России. Техническое и технологическое его переоснащение, модернизация порой сводятся к созданию «своих лучших хозяйств», но, как часто бывает, не в полной мере отвечающих мировому уровню.

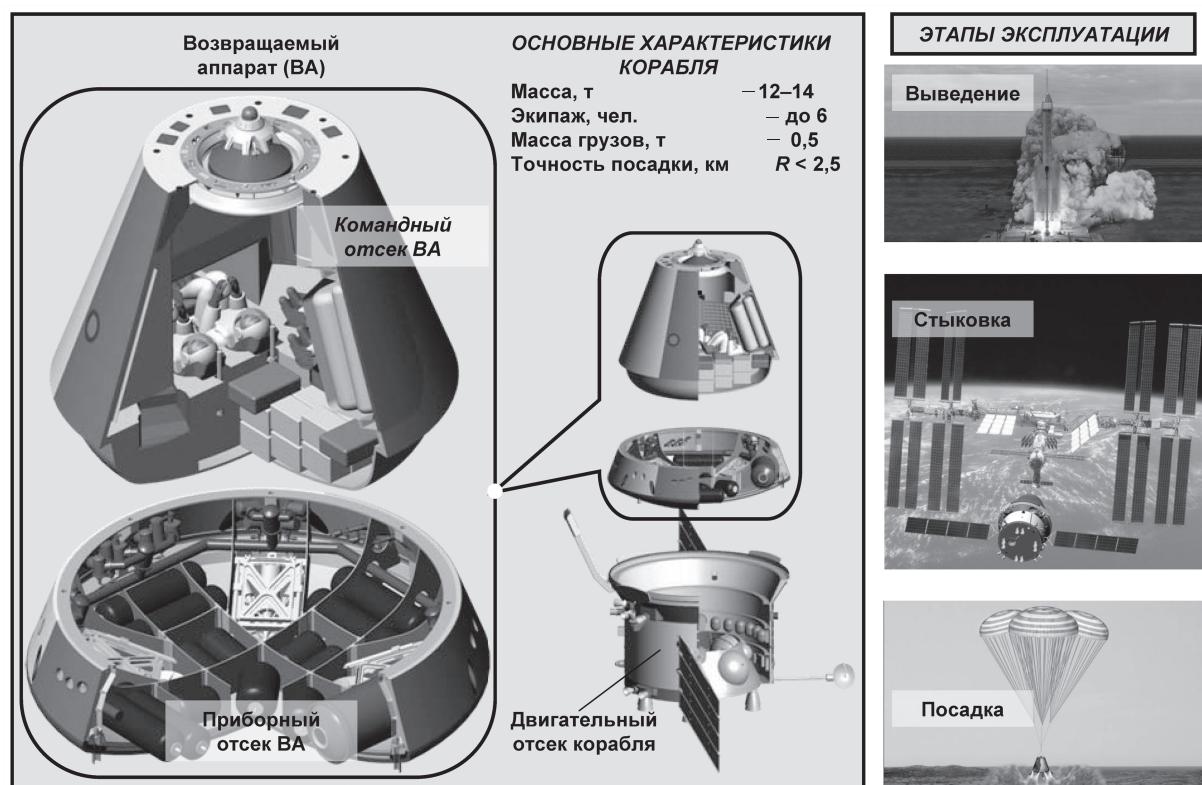


Рис. 2. Пилотируемый транспортный корабль нового поколения, разработанный РКК «Энергия»

В настоящее время большое внимание уделяется созданию перспективных экономически эффективных средств выведения. Широко известно, что российские технологии используются на РКН типа «Зенит» производства Южмаш-завода (Украина). Масса полезного груза этих РКН — около 4 % от стартовой массы. При этом в России сегодня создаются средства выведения с массой полезного груза на уровне 2,5–3 % от стартовой. По американским данным, стоимость доставки 1 кг полезного груза на околоземную орбиту высотой около 200 км составляет около 35 тыс. долл. В два раза увеличив эффективность российских средств выведения, наша страна может существенно укрепить свои позиции на мировом рынке пусковых услуг.

Актуальность автоматических КА наблюдения и дистанционного зондирования Земли

Прошедшие месяцы 2011 года отражают сложную ситуацию, возникшую в некоторых странах после известных катастроф. Между прочим, за 7–8 часов до первых толчков японского землетрясения из космоса было зарегистрировано увеличение магнитуды, а катастрофические толчки состоялись через двое суток. Это в очередной раз напоминает о необходимости создания более надежных методов предупреждения из космоса таких экстремальных событий, в том числе методов с использованием космической техники, т. е. обеспечения прогноза и постоянного мониторинга катастроф на Земле из космоса.

Изучение изменения климата на Земле — тоже одна из задач, при решении которой можно наиболее эффективно использовать средства космического базирования.

Среди перспективных задач — создание современных систем дистанционного зондирования Земли. В настоящее время РКК «Энергия» ведет разработку КА такого назначения, целевая аппаратура которых обладает различной степенью разрешения в разных диапазонах длин радиоволн.

О путях развития отечественной практической космонавтики

К.Э. Циолковский предсказал освоение околоземного пространства, и земляне уже осуществляют масштабную деятельность на мировом рынке пусковых и космических услуг в околоземном космическом пространстве. Объем этого

рынка сопоставим с объемом мирового рынка по разработке и использованию природных ресурсов Земли, он составляет 260–270 млрд долл. ежегодно. Доля России сегодня на этом космическом рынке не превышает полпроцента.

Следует отметить, что отечественная практическая пилотируемая космонавтика уверенно освоила, широко использовала и продолжает использовать технологии станционного обеспечения космической деятельности. Весь мир пошел в этом направлении. Нет необходимости для очередной пилотируемой экспедиции поднимать с Земли на орбиту все требуемое техническое оборудование одним запуском. Надо формировать орбитальные комплексы, применяя отработанные методыстыковки, и таким образом обеспечивать решение задачи той или иной миссии. Безусловно, эта стратегия может использоваться и для осуществления экспедиций в более далекие области космического пространства, а не только вблизи Земли. Предстоящий этап развития деятельности в космосе — освоение Солнечной системы, где необходимо максимально использовать отработанные станционные технологии. Российская космонавтика и РКК «Энергия» обладают всеми этими технологиями.

Предлагаемая РКК «Энергия» концепция создания и развития космической инфраструктуры (рис. 3) условно делится на три уровня. В настоящее время эффективно осуществляется деятельность, соответствующая первому уровню ее развития.

На сегодня использование химической энергетики для решения космических задач практически себя исчерпало. Очередной шаг в этой области — кислородно-водородные системы (как промежуточное решение может быть использован метан и другие природные водородсодержащие газы). Конечно, здесь имеются в виду только экологически чистые средства выведения, применение которых в программах пилотируемых полетов исключает загрязнение окружающей среды. Сегодня представляется рациональным дальнейшее эффективное освоение межпланетного пространства с более широким использованием ядерной энергетики. Именно поэтому становятся актуальными работы по созданию транспортного энергетического модуля (ТЭМ) на базе ядерной энергоустановки мегаваттного класса, или так называемого «ядерного буксира». В его проекте участвуют РКК

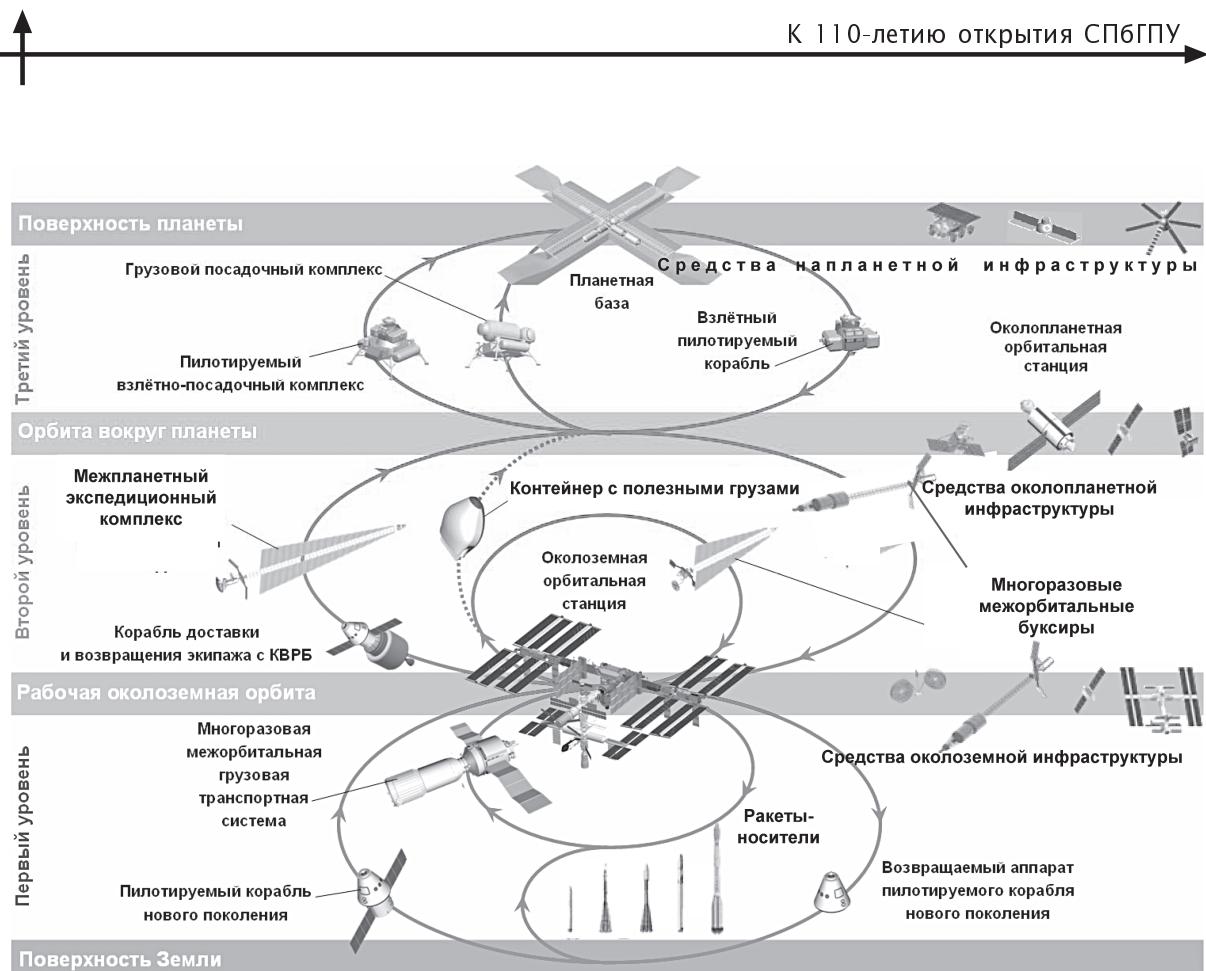


Рис. 3. Состав и уровни космической инфраструктуры, предлагаемой РКК «Энергия»

«Энергия», Исследовательский центр им. М.В. Келдыша и Научно-исследовательский и конструкторский институт электротехники (НИКИЭТ) им. Н.А. Доллежаля.

В целом необходимо думать обо всей космической инфраструктуре и программу работ по ее созданию целесообразно формировать с прицелом на 30, 50, а то и 100 лет вперед. При этом предлагаются учитывать классификацию перспективных космических средств по энерговооруженности, которая основана на потребностях решаемых задач, в том числе по энергообеспечению тех или иных космических служебных и целевых приборов, оборудования и аппаратуры.

Следует обратить внимание на то, что для решения таких перспективных задач, как мониторинг, предупреждение о различных опасностях, на борту КА нужна энергетика от 50 до 500 кВт. А это более тяжелые космические платформы, чем существуют сегодня.

Современные космические средства, которые американские разработчики смогли доставить на низкую околоземную орбиту, обладают

системой энергообеспечения, электрическая мощность которой — порядка 100 кВт. На МКС суммарная вырабатываемая мощность системы электроснабжения — около 120 кВт при рабочей площади всех 16 панелей солнечных батарей около 4 тыс. кв. м. Но это очень сложная конструкция, в том числе и для управления.

Пилотируемым экспедициям в ближнем космосе, например при полетах к Луне, соответствует потребность в бортовой энергетике на уровне от 0,5 до 6 МВт. Пока не рассматриваются пилотируемые полеты дальше, чем к Марсу. Для них в составе межпланетного экспедиционного комплекса потребуются намного большие мощности — по крайней мере, не менее четырех реакторов по 6 МВт каждый. То есть в перспективе базовой будет ядерная энергетика. Других технологий, которые могли бы помочь в решении указанных задач, не существует.

Разворачивание космической инфраструктуры предполагается осуществлять эволюционно с использованием модульного принципа.



Говоря о средствах выведения с Земли на низкую околоземную орбиту, необходимо отметить, что создание РКН сверхтяжелого класса нецелесообразно. Дело в том, что их эксплуатация при массе полезного груза порядка 100 т связана с проблемами, с которыми уже сталкивались и мы, и американцы. Обеспечивающая наземная инфраструктура подготовки и запуска начинает «съедать» ресурсы, которые можно было бы направить на решение задач по целевым программам. Так, например, для американской системы «Спейс Шаттл» ежегодные расходы на обслуживание трех многоразовых кораблей составляли порядка 3,5 млрд долл., а на поддержание наземной инфраструктуры подготовки, запуска, посадки и обеспечения управления полетом — 2,5 млрд долл.

Поэтому наша задача — создавать российскую ракетно-космическую технику, оптимизируя по многим критериям с учетом всех возможных факторов. Наши средства выведения, предназначенные для перспективных кораблей, стараемся «уложить» в 12–15 т массы полезного груза. Такие РКН не потребуют чрезмерной инфраструктуры. Это показал опыт эксплуатации РКН типа «Союз», «Зенит» и др. Для решения задач будущего необходимы РКН тяжелого класса — грузоподъемностью порядка 60 т. При этом космические комплексы больших масс (сотни тонн) предполагается создавать на опорной орбите с использованием принципа модульности и собираемости их на орбите.

Отдельно необходимо остановиться на задаче пилотируемых полетов к Марсу. Известно, что для обеспечения нормальной жизнедеятельности одному человеку при полете в космос необходимо около 10 кг в сутки (включая продукты питания, воду, воздух и другие расходные материалы). Для полета на Марс минимально требуется четыре человека в экипаже. Чтобы обеспечить их полет туда и обратно продолжительностью около двух лет, нужно создать комплекс стартовой массой 480 т на околоземной орбите. При условии использования ядерной энергетики с электрореактивной двигательной установкой это примерно в три-четыре раза более эффективно по сравнению с использованием химической энергетики.

Проектный облик и задачи «ядерного буксира»

Первые представления об облике «ядерного буксира» уже разработаны. Его энергетика предполагается в пределах 150–500 кВт. Стартовые

габариты: 58 м в длину, 22 м в поперечном направлении. Общая длина в рабочем состоянии удлиняется примерно в три раза — до 150 м. Маршевые электрореактивные двигатели буксира размещены на фермах в виде креста. Предложено использовать 20-киловаттные двигатели (создание более мощных потребует большего времени). Предполагается, что на первом этапе его создания будет достаточным именно такой уровень при ядерном реакторе мегаваттного класса. Имеется в виду величина электрической мощности, тепловая же при этом будет около 3 МВт. Это впечатляющие значения. И на первом же этапе необходимо решить задачу сброса избыточного тепла при преобразовании тепловой энергии, выделяемой ядерным реактором, в электрическую. Применение турбомашинного метода преобразования проблематично из-за условий эксплуатации буксира. Дело в том, что с учетом повышенной радиации требование к его ресурсу закладывается на 10–15 лет, а одна из проблем при использовании турбомашинного метода — обеспечение долговечности подшипников или проведения соответствующих ремонтно-восстановительных работ. Конечно, проектанты-разработчики ожидают появления прорывных технических решений по конструкциям на основе термоэмиссионных методов преобразования, но пока перспектив прорыва в этом направлении не видно. Необходимо привлечь особое внимание наших энергетиков к этой проблеме.

Проект буксира связан с необходимостью решения ряда ключевых научных и технических задач. Среди них: создание высокотемпературного безопасного ядерного реактора, над чем работает НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала; технологий производства высокоплотного ядерного топлива (например, на основеnanoструктурированных композиций); высокотемпературных турбин с диапазоном рабочих температур 1200–1500 °C; жаропрочных конструкционных материалов с ресурсом более 100 тыс. ч; высокооборотных электрогенераторов; термоэмиссионного преобразователя энергии мегаваттного уровня; электрореактивных двигателей с мощностью порядка 50 кВт; легких, надежных силовых конструкций; регенеративных систем замкнутого жизнеобеспечения; эффективной радиационной защиты и т. д.

В итоге на основе «ядерного буксира» может быть создана транспортная межпланетная система. Базировать буксир предполагается на око-



лоземной орбите высотой 800–1000 км, чтобы в случае серьезных отказов обеспечить радиационную безопасность его фрагментов (путем естественного уменьшения их радиационного излучения за время аэродинамического торможения в верхней атмосфере Земли).

В текущее время объем мирового рынка межорбитальных транспортировок оценивается примерно 23 млрд долл. в год. К 2020 году прогнозируется его увеличение в два раза. Доля услуг, оказываемых Россией на этом рынке, примерно 30 %. Однако при использовании «ядерного» и других буксиров возможно, как минимум, удвоить это значение.

Примечательно, что если объем рынка пусковых услуг с использованием средств выведения сравнительно небольшой (4–5 млрд долл.), то объем мирового рынка в секторе глобальной космической системы связи и телекоммуникации в прошлом году составлял 82 млрд долл. Доля России здесь — 0,5 % (при этом практически все финансирование у нас госбюджетное). Прогнозируется увеличение объема этого сектора космического рынка к 2020 году более чем в три раза. Если мы будем располагать бортовой энергетикой на уровне 150–500 кВт, то и решать задачу глобальной связи и телекоммуникации станет возможно гораздо меньшим количеством космических средств — «тяжелыми» космическими платформами на основе ТЭМ. И на таком рынке получить 5 % от его объема в 250–260 млрд долл. — это уже достойно.

Конечно, аппараты такие нужны, и в их составе должны быть большие антенны и большая энергетика. Сегодня на геостационарной орбите (ГСО) работают около 300 КА. Более 600 КА летают как балласт — «железо». Частотный ресурс ГСО практически исчерпан, каждая позиция на этой орбите продается по цене от 20 до 50 млн долл. в зависимости от размещения рабочей «точки».

Рынок ежегодной расчистки ГСО, на котором может быть использован «ядерный буксир», оценивается величиной примерно 3 млрд долл. Там необходимо размещать как можно меньше объектов, которые будут работать и позволят создать глобальную информационную инфраструктуру высокого качества.

Для задачи полетов в «дальний космос» бортовая энергетика порядка 0,5 МВт позволит обеспечить перемещение автоматических научных лабораторий массой до 100 т в пределах Солнеч-

ной системы и дальше. Используемые в настоящее время КА с бортовыми системами электроснабжения ограничены по дальности полетов уровнем лучистой энергией, поступающей от Солнца.

Оценка объема данного сектора мирового рынка такова: если в 2009 году почти 1,5 млрд долл. в мире были истрачены на доставку научной аппаратуры к месту назначения в «дальнем космосе», то через 10–15 лет прогнозируется увеличение этого объема примерно в 3,5–4 раза. Доля России здесь должна быть более существенной: сегодня она составляет около 4 %, с появлением «ядерного буксира» должна вырасти до 30 %.

И, наконец, об астероидной и метеоритной опасности. Об этом сегодня много говорят. Но чтобы эффективно начать работать, КА, предназначенные для мониторинга космического пространства и защиты нашей планеты, должны располагать как минимум мощностью бортовой энергетики 150 кВт. Если же создавать аппараты для доставки на астероиды устройств, позволяющих формировать их орбиты, безопасные для Земли, то мощность их бортовой энергетики по оценкам должна быть порядка 1–10 МВт.

Говоря об освоении планет и Луны с использованием баз на их поверхностях, можно отметить, что в основе энергосистемы баз рассматривается применение компактного ядерного реактора электрической мощностью 150–500 кВт. Такие реакторы могут использоваться и в северных регионах Земли.

РКК «Энергия» впервые анонсировала предложения по концепции космической программы до 2040 года на Международном авиационно-космическом салоне 2009 года. Она была с интересом воспринята, в том числе и теми производственными компаниями мирового уровня: «Локхид» (США), «Астриум» (Европа), «Мишубиси» (Япония). Мы объединились вокруг этой программы. Ежеквартально наши сотрудники проводят дискуссию, осуществляется отработка следующих шагов на перспективу. Поскольку в этой кооперации сотрудничают промышленные предприятия, то они свою миссию видят в одном: чтобы идеи не были иллюзорными. Их необходимо направить сразу на тот технический уровень, который реализуем. Создавая новую ракетно-космическую технику, мы исходим из достижений сегодняшнего дня. Любой компонент, который еще только находится в начале

разработки, в исследовании, не имеет права быть принят для использования в этой технике.

Концепция программы на период до 2040 года, предлагаемая РКК «Энергия», была представлена Председателю Правительства России.

Предложения в их основе получили одобрение. Работы в данном направлении необходимо продолжать, имея в виду их соответствующее отражение в программах и бюджете Роскосмоса на перспективу.

УДК 681.5

Е.И. Юрьевич

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

Современная робототехника возникла как промышленная робототехника в машиностроении (где все предельно детерминировано, кроме номенклатуры самих роботов) и сразу же начала чрезвычайно быстро разрастаться. Первое обстоятельство позволило в промышленных роботах первого поколения использовать простейшее программное управление (ЧПУ), заимствованное, как и приводы, из станкостроения. Второе обстоятельство породило модульный принцип построения роботов, который был предложен в СССР и до настоящего времени является господствующим у всех производителей роботов в мире.

Следующим направлением развития роботов стала экстремальная робототехника. Толчком к ее развитию в нашей стране оказалась авария на Чернобыльской АЭС. Именно здесь модульный принцип показал свою эффективность и в этой области робототехники. Сборка роботов из отработанных функциональных компонентов — модулей — позволила ЦНИИ РТК буквально в двухмесячный срок спроектировать, поставить и ввести в эксплуатацию до 15 мобильных роботов различного назначения. Одновременно

стало очевидным, что в этих условиях вследствие неопределенности и изменчивости внешней среды программное управление пригодно только в качестве нижнего уровня супервизорного управления, а основным способом стало дистанционное управление с помощью джойстиков и оснащения роботов системами технического зрения и другими сенсорными системами.

Далее в ходе развития экстремальной робототехники начало развиваться адаптивное управление с постепенным наращиванием использования методов искусственного интеллекта. Но в русскоязычном переводе термин *Intelligence* — это искусственный разум. И так получилось, что именно экстремальная робототехника стала авангардом развития робототехники в целом. Достигаемые здесь результаты стали затем осваиваться промышленной робототехникой и другими ее разделами.

Современной тенденцией в развитии экстремальной робототехники являются модульные робототехнические системы с оперативно изменяемой комплектацией, в том числе и непосредственно в ходе выполнения очередной работы. Это так называемые реконфигурируемые роботы, т. е. роботы с переменной структурой. Высший уровень таких роботов, предел их развития — самоорганизующиеся роботы, автоматически эволюционно совершенствующие свою структуру в ходе функционирования.

Для реализации этих возможностей, очевидно, необходимо располагать типоразмерными рядами основных функциональных модулей. На рис. 1 это иллюстрируется обобщенной конструкцией наземного мобильного робота подобного типа.

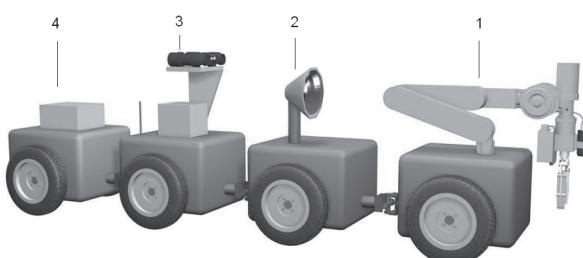


Рис. 1. Типовая структура модульного робота «Робопоезд»

1, 2, 3, 4 — варианты модулей: манипуляционного, сенсорики, связи, энергопитания



Этапы миниатюризации функциональных компонентов

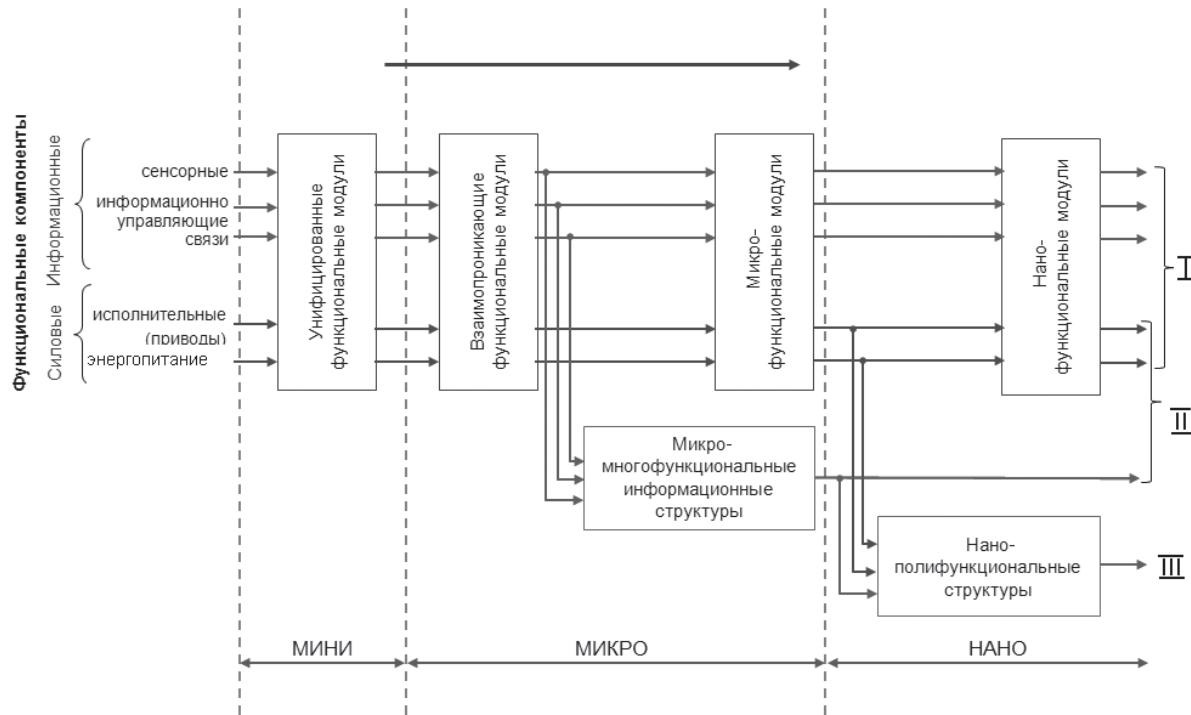


Рис. 2. Развитие миниатюризации функциональных компонентов роботов

Такой робот может иметь произвольное число транспортных двухколесных модулей с различными сочленениями. Колеса могут быть снабжены гусеницами или заменены педипуляторами из тех же шарнирных модулей, из которых формируются манипуляторы. Транспортные модули загружаются различными информационными и силовыми модулями.

Именно подобный подход должен прийти на смену традиционному накоплению парка специальных роботов фиксированной структуры. Это не только обеспечит покрытие всей требующейся сегодня и в будущем номенклатуры робототехнических систем с обеспечением указанной структурной адаптации, но и резко сократит расходы на их проектирование и производство, упростит техническое обслуживание.

На рис. 2 показано развитие процесса миниатюризации функциональных компонентов роботов.

На рубеже перехода от мини- к микроразмерностям возникает процесс постепенного конструктивного слияния функциональных компонентов роботов и соответственно появляется параллельная нить дальнейшей миниатюризации

путем объединения информационных компонентов на общей однородной структуре, прежде всего нейросетевой. В более далекой перспективе этот процесс должен охватить и силовые компоненты — приводные и энергопитания. Возрождением модульного принципа построения робототехнических систем в новой размерности станет, как показано на рис. 2, создание многофункциональных модулей типа клеток живых организмов.

Развитие реконфигурируемых систем на основе многофункциональных модулей привело

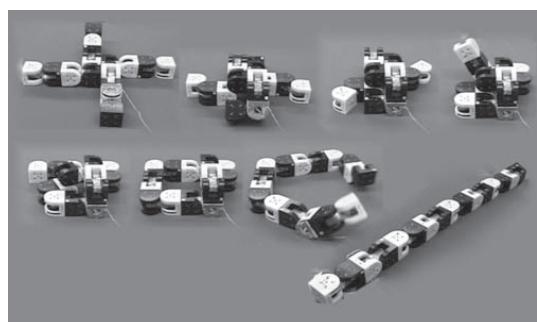


Рис. 3. Самореконфигурируемый миниробот M-TRAN III
(AIST/Tokyo Institute Technology, Япония)

к становлению нового научно-технического направления самоорганизующихся систем, которое помимо робототехники охватило уже ряд других видов техники различного назначения.

На рис. 3 приведен пример такого реконфигурируемого робота в нескольких компоновках.

Показанный на рис. 3 реконфигурируемый робот состоит из многофункциональных модулей в виде двух поворотных половин, внешние стороны которых снабжены устройствами механического и электрического соединения с другими модулями и ИК дальномерами. Управление модулем осуществляется с помощью микропроцессоров, которые объединяются в локальную сеть робота.

Ближайшие этапы развития этого направления — создание теории и методики проектирования само- и взаиморемонтирующихся, а затем и самовоспроизводящихся систем. Следующий этап — это самосовершенствующиеся системы и, прежде всего, конечно, эволюционное развитие «технического разума». Отправной точкой последнего служат основанные на знаниях современные системы искусственного интеллекта.

Основные технические перспективы этого направления связаны с системами наноразмерности, формирующими из сотен и тысяч единиц многофункциональных модулей-аналогов клеток живых организмов. Миниробототехника при этом выполняет роль полигона для физиче-

ского моделирования и исследования структур и способов группового управления такими большими системами. Конечно, эти перспективы найдут прежде всего применение непосредственно в самой робототехнике.

В рамках указанного нового направления возникла и новая проблема группового управления большими распределенными, в общем случае асинхронными, системами, которая кардинально отличается от подобной проблематики традиционной робототехники.

Как показано на рис. 2, на рубеже перехода от мини- к микроразмерности в робототехнике наряду с указанным развитием модульных роботов развивается процесс постепенного взаимного проникновения отдельных функциональных модулей и их слияние с целью сокращения массогабаритных параметров. Одним из результатов такой интеграции являются и указанные многофункциональные модули.

Как показано, начало этого интеграционного процесса было положено исследованиями перспектив объединения информационных модулей роботов — сенсорных, управляющих, связи — на основе технических нейронных сетей.

Конечно, рассмотренные здесь тенденции относятся к развитию робототехники в целом, однако наиболее острая потребность в их реализации существует в экстремальной робототехнике, включая космическую, подводную, военную.



ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.3

В.Я. Фролов, А.В. Коротков

О ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМАТИВНЫХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И СТРУКТУРЫ ФАКТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

При установлении тарифа на передачу электроэнергии возникает задача обоснования нормативных потерь. Одновременно с этим должна решаться задача точного определения структуры «сверхнормативных потерь» электроэнергии, данные о которых используются при разработке рациональных мероприятий по повышению эффективности передачи электроэнергии.

Указанные задачи могут быть решены только при условии точного определения составляющих отчетных потерь в электрических сетях, в том числе составляющих нормативных потерь электроэнергии как части отчетных.

Для оценки наиболее значимых составляющих потерь электроэнергии проведен анализ структуры отчетных потерь электроэнергии в электрических сетях с высшим напряжением 6–10 кВ городов и поселков Ивановской области за период 2005–2008 годов [1]. Результаты проведенного анализа следующие:

Статьи потерь электроэнергии по сети 6–10 и 0,4 кВ	Величина потерь, %
Условно-постоянные потери в трансформаторах 6–10 кВ	1,39–3,16
Нагрузочные потери в трансформаторах 6–10 кВ	0,29–1,33
Нагрузочные потери в линиях 6–10 кВ	0,45–1,39
Потери от токов утечки по изоляторам ВЛ	0,00–0,09
Потери в оборудовании подстанций	0,20–0,52
Потери в измерительных трансформаторах и разрядниках 6–10 кВ	0,00–0,09

Расход электроэнергии на собственные нужды	0,11–1,02
Потери в изоляции силовых кабелей 6–10 кВ	0,03–0,07
Потери в измерительных трансформаторах и электросчетчиках 0,4 кВ	0,15–0,90*
Потери, обусловленные погрешностью системы учета	0,30–0,91 (2,49**)
Нагрузочные потери в сети 0,4 кВ	4,35–8,28
Коммерческие потери (в основном недоучет и хищения)	0,2–6,8

Эти данные свидетельствуют о том, что наиболее значимы в структуре потерь предприятий городских электрических сетей следующие составляющие: I — условно-постоянные потери в трансформаторах 6–10 кВ; II — нагрузочные потери в сети 0,4 кВ; III — коммерческие потери, определяемые в основном недоучетом отпуска электроэнергии потребителям и хищениями электроэнергии.

Для возможности их анализа были проведены специальные исследования, по результатам которых разработаны методики оценки составляющих нормативных потерь в городских электросетях.

Условно-постоянные потери в трансформаторах 6–10 кВ. В современных инструкциях по

* Большие значения характерны для городских электрических сетей с большим числом бытовых потребителей электроэнергии.

** Значение получено для электрической сети, поступление электроэнергии в которую осуществляется по одному фидеру на напряжении СНП.

расчету потерь электроэнергии в трансформаторах [2, 3] указывается, что потери холостого хода (далее — ХХ) в силовом трансформаторе определяются на основе его паспортных данных и при проведении расчетов могут корректироваться.

Если в [2] отмечено, что при установлении нормативов потерь электроэнергии в электрических сетях может учитываться техническое состояние объектов электросетевого хозяйства, то в [3] для определения потерь мощности ХХ трансформаторов дана более конкретная формулировка: «Допускается для силовых трансформаторов (автотрансформаторов) потери мощности ХХ определять с учетом их технического состояния и срока службы путем измерений этих потерь методами, применяемыми на заводах-изготовителях при установлении паспортных данных трансформаторов (автотрансформаторов)».

Разработана методика оценки увеличения потерь мощности ХХ в зависимости от срока эксплуатации трансформатора. Разработка методики проводилась по результатам испытаний трансформаторов распределительных электрических сетей с высшим напряжением 6–10 кВ [4].

Проведены измерения потерь ХХ трансформаторов с высшим напряжением 6–10 кВ в распределительных электрических сетях Ивановской области. Измерения проводились в соответствии с методикой проведения опыта ХХ, изложенной в ГОСТ 3484–77 «Трансформаторы силовые. Методы испытаний». Получены данные о значении потерь холостого хода ΔP_{XX} более 1300 (отечественных и импортных) трансформаторов с номинальной мощностью от 20 кВ·А до 630 кВ·А, введенных в эксплуатацию с 1941-го по 2004 год.

Для 958 трансформаторов с установленными паспортными значениями и датой ввода трансформатора в эксплуатацию проведен расчет величины превышения паспортного значения потерь ХХ трансформатора $\Delta P_{XX\text{пасп}}$ реальным значением $\Delta P_{XX\text{реал}}$:

$$\Delta P_{XX}^* = \frac{\Delta P_{XX\text{реал}} - \Delta P_{XX\text{пасп}}}{\Delta P_{XX\text{пасп}}} \cdot 100, \%$$

Установлено, что трансформаторы с большим сроком эксплуатации $T_{\text{сл}}$ имеют большее значение ΔP_{XX}^* . При явно выраженной тенденции роста значений ΔP_{XX}^* с ростом срока эксплуатации

$T_{\text{сл}}$, отмечен большой разброс значений ΔP_{XX}^* , полученных в результате измерений.

В результате обработки экспериментальных данных о потерях холостого хода удалось установить, что для трансформаторов всех типов со сроком службы до 20 лет зависимости $\Delta P_{XX}^* = f(T_{\text{сл}})$ близки к линейной зависимости $\Delta P_{XX}^* = C$ со средним значением, близким к нулю.

Изменение величины потерь холостого хода трансформаторов «старше» 20 лет для всех типов трансформаторов может быть охарактеризовано зависимостью $\Delta P_{XX}^* = A + BT_{\text{сл}}$ со средней скоростью изменения 1,75 % в год.

Нагрузочные потери в сети 0,4 кВ. Основные «ошибки» в расчетах нагрузочных потерь обусловлены использованием завышенного значения коэффициента формы k_{ϕ} суточных графиков нагрузки потребителей. Так, при отсутствии реальных графиков можно использовать в соответствии с [2] значение $k_{\phi} = 1,33$, а в соответствии с [3] — $k_{\phi} = 1,15$, в то время как в результате исследований реальных графиков нагрузки потребителей ЖКХ городов [5] получены значения k_{ϕ} фидеров 0,4 кВ городских подстанций, не превышающие 1,12–1,14.

Вследствие завышения расчетного значения потерь в тариф включаются завышенные «сверхнормативные» потери, и о реальной величине «сверхнормативных» потерь создается искаженное представление. С учетом того, что в городских электрических сетях нагрузочные потери в сети 0,4 кВ в общей структуре потерь могут достигать 50 % и более, точное определение этих потерь электроэнергии имеет особое значение.

С целью улучшения ситуации предложено график электропотребления, рассчитываемый для фидера питания участка города, определять с использованием «типовых» графиков электропотребления $P^*(t) = P(t) / P_{\text{ср}} \text{сут}$ для характерных групп потребителей. Общий график, по которому проводится расчет значения k_{ϕ} , должен определяться не только с использованием «типовых» графиков $P^*(t)$, но и с учетом долевого участия каждой отдельной группы потребителей в общем электропотреблении фидера.

Все потребители электроэнергии в городских сетях при проведении исследования были разделены по типам городской застройки на характерные группы с выделением потребителей объектов инфраструктуры города. Для каждого типа



застройки получены суточные графики активной мощности. В соответствии с нормативными положениями методик расчета [3] графики определялись отдельно для рабочих и нерабочих дней недели. Всего получено 186 суточных графиков электрических нагрузок при исследовании группы потребителей из 2348 абонентов в 14 населенных пунктах семи электрических сетей.

Полученные результаты регистрации графиков по отдельным группам потребителей характеризуются высокой плотностью, что свидетельствует о возможности точного описания реального графика $P = f(t)$ группы потребителей в городских электросетях.

Расчеты показывают, что значения k_{ϕ} для графиков фидеров, обеспечивающих питание реальной нагрузки участков города, не превышают значений $k_{\phi} = 1,03 - 1,04$. Такие значения соответствуют показателям реальных графиков нагрузки фидеров, обеспечивающих питание потребителей городских электросетей.

Коммерческие потери. Во многих электрических сетях величину «сверхнормативных» потерь определяет систематическая погрешность индукционных электросчетчиков бытовых потребителей. В городских электросетях, где установлены десятки и сотни тысяч устаревших индукционных электросчетчиков бытовых потребителей, имеет место недоучет электроэнергии H_d , составляющий по оценкам [6] величину порядка 5 % и более.

В результате электросетевые предприятия несут значительный ущерб, на этих предприятиях разрабатываются не отвечающие реальности планы эксплуатации электрических сетей, в частности планы по снижению потерь. Это обусловлено необходимостью поиска метода определения величины H_d .

В идеале определение величины H_d должно проводиться расчетным путем. Была поставлена задача: экспериментальным путем определить зависимость систематической составляющей относительной погрешности однофазных индукционных счетчиков различных типов от срока эксплуатации после последней поверки (с момента установки, если электросчетчики в процессе эксплуатации не поверялись). Такая работа проводилась на базе городских электросетей Ивановской области.

Проводилось определение систематической составляющей относительной погрешности однофазных индукционных счетчиков H_d , установленных у бытовых потребителей электроэнергии. Измерения проводились в лабораториях в соответствии с требованиями ГОСТ 8.259–2004 «Счетчики электрические индукционные активной и реактивной энергии. Методика поверки».

Проведены измерения величины H_d для счетчиков с разными сроками службы после последней поверки (до 50 лет и более) при различных электрических нагрузках (20, 40, 60, 80 и 100 % от номинальной). Проведены лабораторные испытания более 2000 электросчетчиков классов точности 2,0 и 2,5 [7].

По результатам измерений характеристик всех электросчетчиков выборки получены зависимости систематической погрешности H_d от срока службы счетчика T_{cl} , которые представляют собой линейные зависимости:

$$H_d = -0,426T_{cl} - 1,91 \quad (1)$$

для нагрузки 20 % от номинальной нагрузки счетчика;

$$H_d = -0,398T_{cl} - 1,56 \quad (2)$$

для нагрузки 100 % номинальной.

Аналогичные зависимости получены для нескольких основных типов счетчиков выборки, что позволяет говорить о возможности использования зависимостей $H_d = f(T_{cl})$, определяемых соотношениями (1) и (2), для всех типов индукционных счетчиков класса точности 2,5. Полученные данные о значениях H_d разных типов электросчетчиков находятся в пределах погрешности определения среднего значения величины H_d , %, по выражениям (1) и (2).

Выражения (1) и (2) использовались при расчете величины отпущененной, но не учтенной этиими счетчиками энергии. Для городских электросетей Ивановской области недоучет отпущененной электроэнергии, обусловленный систематической погрешностью однофазных индукционных электросчетчиков, составляет от 2,5 до 5,7 % от общего отпуска электроэнергии потребителям. Эти данные хорошо согласуются с аналогичными оценками величины неучтенного отпуска электроэнергии в городских электросетях, в частности с данными [6].

Основные результаты исследования сводятся к следующему:

1. Потери холостого хода трансформаторов, существенно возрастают с течением срока службы. Это изменение потерь холостого хода следует учитывать при расчете потерь энергии в распределительных электрических сетях.

Для трансформаторов со сроком службы до 20 лет допустимо принимать потери холостого хода равными паспортным значениям. Для трансформаторов со сроком службы более 20 лет — потери холостого хода возрастают в среднем с интенсивностью 1,75 % в год.

2. Полученные результаты исследований графиков нагрузки городских электрических сетей могут использоваться в расчетах нагрузочных потерь в сетях 0,4 кВ при определении коэффициента формы графиков электрических нагруз-

зок. Рекомендуемое современными нормативными документами значение этого коэффициента завышено, что приводит к завышению результатов расчета до 1,5 раз и более.

3. При учете электроэнергии, регистрируемой однофазными счетчиками, систематическая погрешность, определяющая величину недоучета отпущененной электроэнергии и увеличивающаяся с увеличением срока службы счетчика, может быть найдена расчетным путем. По результатам расчетов может быть оценен объем и эффективность мероприятий по снижению потерь электроэнергии путем совершенствования системы учета отпуска электроэнергии бытовым потребителям.

4. Использование полученных результатов позволит повысить точность определения структуры потерь электроэнергии в электрических сетях городов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротков, А.В. О структуре норматива потерь для электросетевых предприятий ЖКХ [Текст] / А.В. Коротков, В.В. Коротков, В.А. Шuin // Состояние и перспективы развития электротехнологии. Тезисы докладов междунар. научно-техн. конф. (XIV Бенардосовские чтения) / ГОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет, Иваново.— 2007.— Том 1.— 259 с.

2. Приказ Минпромэнерго РФ от 04.10.2005 г. № 267 «Об организации в Министерстве промышленности и энергетики РФ работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям» [Текст] / Минпромэнерго РФ.

3. Инструкция по организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям [Текст] / Утвержден Приказом Минэнерго № 326 от 30 декабря 2008 года.

4. Коротков, В.В. Количественная оценка зависимости потерь холостого хода силовых трансформаторов от срока эксплуатации [Текст] / В.В. Коротков, А.Б. Козлов, А.В. Коротков // По-

вышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. VIII / Под ред. В.А. Шунина, М.Ш. Мисриханова, А.В. Мошкарина.— Иваново.— 2007.— С. 351–356.

5. Тарнижевский, М.В. Электрооборудование предприятий жилищно-коммунального хозяйства [Текст]: Справочник / М.В. Тарнижевский, Е.И. Афанасьева.— М.: Стройиздат, 1987.— 368 с.

6. Казанцев, А.В. Влияние систематической составляющей относительной погрешности однофазных индукционных счетчиков бытового сектора на определение величины товарной продукции энергопредприятия [Текст] / А.В. Казанцев, В.И. Теличкин, А.С. Садовская, И.А. Казанцева // Нормирование, анализ и снижение потерь в электрических сетях. Информ. матер. / НЦ ЭНАС.— М. 2002.

7. Коротков, А.В. О недоучете электроэнергии индукционными электросчетчиками [Текст] / А.В. Коротков, В.А. Шuin // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: 13-я Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. 1-2 марта 2007 г. : В 3-х т.— М.: Издательский дом МЭИ, 2007. ISBN 978-5-903072-98-9 Т. 3.— 428 с. ISBN 978-5-903072-95-8.



УДК 621.3

A.B. Сысоев, С.В. Смоловик

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ РАЗВИТИЯ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ МЕЖСИСТЕМНОЙ СВЯЗИ

В статье рассматриваются режимы работы энергосистемы, содержащей сечение, состоящее из двух линий разных классов напряжения: ВЛ 500 кВ и параллельной ей линии 220 кВ, которая испытывает значительные перегрузки при аварийном отключении линии 500 кВ. При этом возникает угроза значительного снижения напряжения, что может привести к «опрокидыванию» нагрузки и масштабному отключению потребителей.

Анализируются несколько вариантов предотвращения развития аварийной ситуации:

ограничение тока в линии за счет установки продольных реакторов;

установка источников реактивной мощности (ИРМ);

установка дополнительной генерации активной мощности в узлах сети;

сооружение дополнительных линий.

Краткая характеристика рассматриваемой энергосистемы

Установленная электрическая мощность электростанций объединения составляет 7000 МВт. Ежегодно энергосистема вырабатывает более 23 миллиардов кВт·ч электрической энергии.

Протяженность линий электропередачи на напряжением 35–500 кВ составляет более 12 тысяч километров, протяженность воздушных и кабельных линий распределительных сетей 0,4–10 кВ — более 50,8 тысячи километров. На рисунке показана схема основных электрических сетей рассматриваемой энергосистемы.

Основа электрической сети — четыре подстанции 500 кВ, соединенные линиями 500 кВ. По линиям 500 кВ также осуществляется связь с соседними энергосистемами.

Сети более низких классов напряжений — 220 и 110 кВ — достаточно разветвленные, образуют большое количество замкнутых контуров. В це-

лом в энергосистеме действует 10 электростанций: ЗГРЭС (2400 МВт), НТЭЦ-1 (1180 МВт), НТЭЦ-1 (850 МВт), НТЭЦ-2 (420 МВт), КТЭЦ-3 (405 МВт), КТЭЦ-1 (190 МВт), КТЭЦ-2 (175 МВт), УГРЭС (161 МВт), НГЭС (1205 МВт). Наибольшая плотность линий 110 и 220 кВ наблюдается в районе НТЭЦ и КТЭЦ.

Одной из особенностей энергосистемы является ее разделение на две части рекой. Связь этих двух частей осуществляется по двум линиям: ВЛ 500 кВ (Линия 1, 207 км); ВЛ 220 кВ (Линия 2, 92,7 км).

В связи с малым количеством параллельных линий рассматриваемое сечение является потенциально аварийным местом энергосистемы, требующим усиления.

Режимы работы энергосистемы

Наиболее тяжелым режимом работы энергосистемы является режим зимнего максимума нагрузок (табл. 1). Активная нагрузка в данном режиме составляет 3888 МВт, реактивная — 1499 МВАр. Летний режим характеризуется значительно более низкой величиной потребления активной мощности (2681 МВт), а потребление реактивной мощности остается практически на том же уровне (1282 МВАр). В дальнейших исследованиях будет рассматриваться только режим зимнего максимума нагрузок как наиболее характерный.

Анализ сети в режиме зимнего максимума нагрузок (см. табл. 1) показывает, что практически вся активная мощность, потребляемая нагрузкой (3888 МВт), вырабатывается внутри исследуемой энергосистемы (3877 МВт). По системообразующим линиям сети 500 кВ осуществляется транзитный переток мощности из других энергосистем, и загрузка указанных линий составляет в среднем 300–400 МВт. Наблюдаются значительный поток мощности по Линии 1, ее загрузка — (805 + j95) МВА.

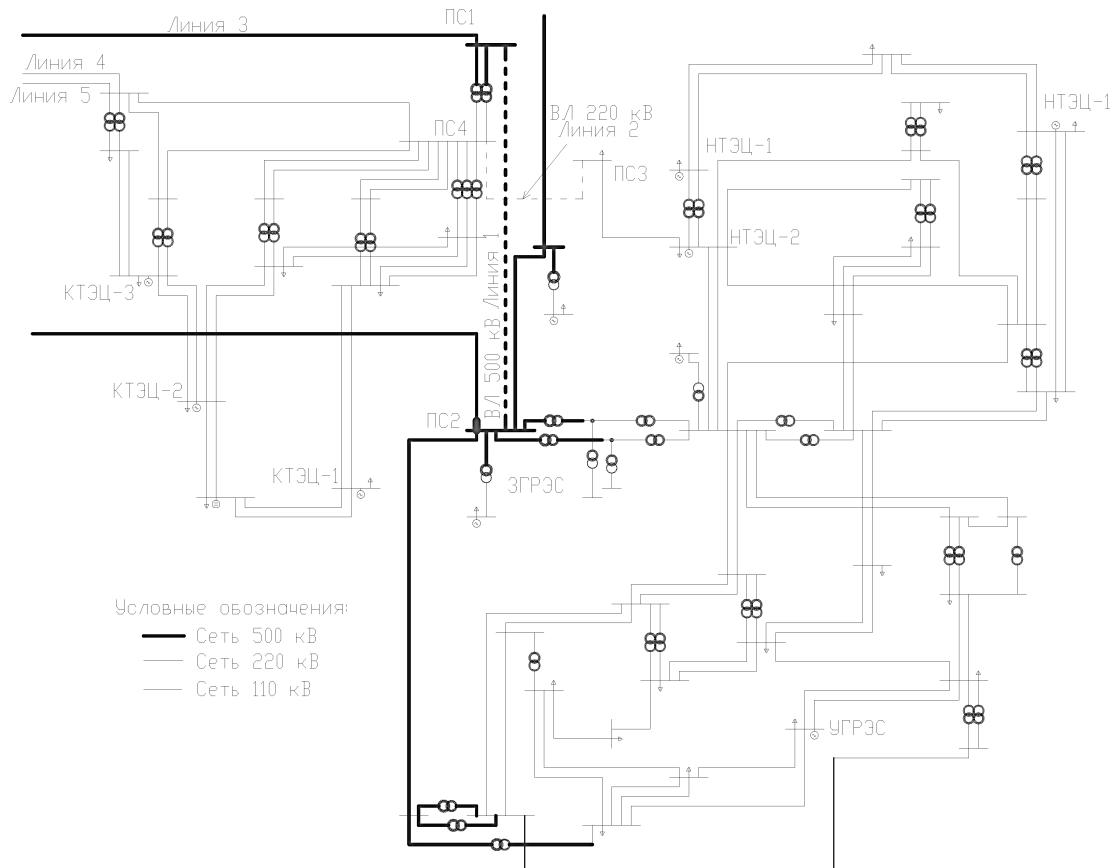


Схема основных электрических сетей исследуемой энергосистемы

Таблица 1

Основные показатели сети в нормальных режимах

Режим работы сети	$P_{\Sigma_{\text{стан}}}$, МВт	$Q_{\Sigma_{\text{стан}}}$, МВАр	$P_{\Sigma_{\text{нагр}}}$, МВт	$Q_{\Sigma_{\text{нагр}}}$, Мвар	ΔP_{Σ} (потери), МВт	ΔQ_{Σ} (потери), Мвар	$P_{\Sigma_{\text{внеш}}}$, МВт	$Q_{\Sigma_{\text{внеш}}}$, Мвар
Зимний максимум	3877	931	3888	1499	48,47	-286,17	-59	-281
Зимний минимум	3047	567	3061	1179	31,34	-543,19	-46	-69
Летний максимум	2598	819	2681	1282	43,66	-276,61	-126	-187
Летний минимум	1736	547	2139	927	25,70	-533,21	-429	153

Линии 220 кВ передают мощность от генерирующих станций и трансформаторных подстанций 500/220 кВ в распределительную сеть 110 кВ и далее к потребителям. Средняя величина потока мощности по линиям 220 кВ составляет 100 МВт. Загрузка Линии 2 (ВЛ 220 кВ) в нормальном режиме составляет 140 МВт.

Величины напряжений в разных узлах рассматриваемой сети значительно различаются. Так, на подстанции 500 кВ ПС1 в нормальном режиме значение напряжения меньше номинального и составляет 492 кВ. На соседней подстанции ПС2 значение напряжения достигает 515 кВ. В сети 220 кВ значения напряжений варьируются



от 219 кВ (в районе ПС3) до 230 кВ (вблизи мощной электростанции НТЭЦ). Загрузка и напряжения по концам исследуемой Линии 2 в нормальном режиме зимнего максимума следующие:

$P_{\text{Линия 2}}$	.....	-140 МВт
$Q_{\text{Линия 2}}$	.....	20 МВАр
$U_{\text{ПС3}}$	.....	224,0 кВ
$U_{\text{ПС4}}$	.....	223,0 кВ

В случае аварийного отключения Линии 1 (500 кВ) происходит перераспределение потоков мощности в рассматриваемой сети и параллельная ей Линия 2 (220 кВ) перегружается. При этом показатели режима всей энергосистемы значительно ухудшаются (потери активной мощности возрастают в 3 раза, потери реактивной мощности увеличиваются более чем на 500 МВАр):

$P_{\Sigma \text{ стан}}$	.....	3877 МВт
$Q_{\Sigma \text{ стан}}$	.....	1354 МВАр
$P_{\Sigma \text{ нагр}}$	.....	3888 МВт
$Q_{\Sigma \text{ нагр}}$	.....	1499 МВАр
ΔP_{Σ} (потери)	.....	146,68 МВт
ΔQ_{Σ} (потери)	.....	358,06 МВАр
$P_{\Sigma \text{ внеш}}$	.....	-157 МВт
$Q_{\Sigma \text{ внеш}}$	.....	-502 МВАр

На обоих концах линии снижается напряжение, значения становятся меньше номинального (220 кВ), что видно из следующих показателей аварийного режима Линии 2 в период зимнего максимума:

$P_{\text{Линия 2}}$	.....	-552 МВт
$Q_{\text{Линия 2}}$	.....	18 МВАр
$U_{\text{ПС3}}$	.....	205,9 кВ
$U_{\text{ПС4}}$	.....	213,5 кВ

На основании приведенных параметров режимов сети видно, что сечение, включающее в себя Линию 1 (500 кВ) и Линию 2 (220 кВ), является недостаточно надежным местом энергосистемы.

На Линии 2 длиной 92,7 км используется провод АСО-400. При температуре наружного воздуха +25 °C данный провод способен выдержать ток 860 А. При более низких температурах пропускная способность увеличивается, и при температуре 0 °C указанный провод способен выдержать ток 1066 А.

В соответствии с инструкцией по эксплуатации противоаварийной автоматики (ПА) на линии 220 кВ установлены следующие уставки срабатывания автоматики:

I ступень — 800А (с 01.04 по 01.10) и 1000А (с 01.10 по 01.04); происходит загрузка генераторов на соседних станциях;

II ступень — 1000А (с 01.04 по 01.10) и 1100А (с 01.10 по 01.04); происходит подача сигнала на отключение линии.

В дальнейших расчетах для упрощения вычислений предельно допустимое значение тока принимается равным 800 А. При превышении данного значения тока в рассматриваемой энергосистеме будет моделироваться срабатывание противоаварийной автоматики и, как следствие, отключение Линии 2.

При аварийном отключении Линии 1 (500 кВ) наблюдается значительная токовая перегрузка параллельной Линии 2 (220 кВ). Происходит срабатывание противоаварийной автоматики на Линии 2, что влечет за собой ее отключение. При двух неработающих линиях, входящих в слабое сечение системы, становится невозможным рассчитать установившийся режим, что свидетельствуют о потере устойчивости энергосистемы и опасности развития системной аварии.

Для предотвращения серьезных последствий из-за отключения Линии 1 (500 кВ) в данной статье рассматриваются мероприятия, которые позволяют сохранить Линию 2 в работе и предотвратить нарушение устойчивости энергосистемы.

Режим сети с установленными продольными реакторами в Линии 2

Наиболее простой способ снижения токовой загрузки линии — включение последовательно в линию токоограничивающего реактора. В этом случае происходит увеличение общего сопротивления линии и, как следствие, уменьшение протекающего по линии тока.

В табл. 2 представлены основные показатели режима Линии 2 (220 кВ) при установленных в нее реакторах с различными индуктивными сопротивлениями.

При увеличении индуктивного сопротивления реактора активная мощность, передаваемая по линии, снижается. В то же время увеличиваются потери реактивной мощности в линии, что влечет за собой увеличение реактивной мощности, потребляемой линией. Так, при установке реактора $X = 50$ Ом потери ΔQ в линии составляют 439 МВАр.

Таблица 2
Показатели режима ВЛ 220 кВ
при установке реактора

X , Ом	$P_{\text{линии}}$, МВт	$Q_{\text{линии}}$, МВАр	$U_{\text{пс3}}$, кВ	$U_{\text{пс4}}$, кВ
0	551	17	213	205
10	521	30	231	203
20	492	68	231	201
30	466	99	212	200
40	441	126	212	199
50	418	149	212	198

В итоге не происходит значительного снижения тока в линии, а потому аварийное отключение Линии 1 (500 кВ) приведет к срабатыванию противоаварийной автоматики, и устойчивость энергосистемы нарушится.

Оценка эффективности установки ИРМ

При аварийном отключении Линии 1 (500 кВ) и, как следствие, отключении Линии 2 (220 кВ) в энергосистеме наблюдается нарушение статической устойчивости. Это обусловливается тем, что связь района электрической сети вблизи КТЭЦ со всей энергосистемой значительно ослабевает. Сечение, по которому поступает мощность из внешней сети, содержит всего три линии: одну ВЛ 500 кВ и две линии 220 кВ. Величина передаваемой мощности составляет 257 МВт.

Один из способов сохранения устойчивости энергосистемы сводится к проведению мероприятий, связанных с повышением общего уровня напряжения в энергосистеме. В этом случае при сохранении величины нагрузки потребителей на прежнем уровне токовая загрузка линий снижается и соответственно улучшаются показатели режима.

Для этих целей на каждой подстанции в районе КТЭЦ фиксируется напряжение на уровне 1,05–1,1 $U_{\text{ном}}$, т. е. при расчете режима в каждом узле моделируется установка источника реактивной мощности (ИРМ) с достаточно широкими пределами регулирования.

Однако расчет показал, что предложенное мероприятие не позволяет предотвратить аварию: при отключении Линии 1 и Линии 2 в энергосистеме происходит нарушение устойчивости.

В качестве другого способа сохранения устойчивости энергосистемы, связанного с уста-

новкой ИРМ, можно рассматривать мероприятия, позволяющие снизить токовую нагрузку линий, входящих в слабое сечение (Линии 3, 4, 5). В этом случае за счет установки источников реактивной мощности по концам указанных линий предполагается поддерживать напряжение на одинаковом уровне: для линий классом напряжения 220 кВ — на уровне 230 кВ, для линий 500 кВ — 525 кВ. (При расчете режима рассмотрена установка в шести узлах схемы источников реактивной мощности или реакторов требуемой величины для поддержания заданного значения напряжения). При этом поток реактивной мощности по данному сечению будет сведен к минимальному значению, что позволит увеличить передачу активной мощности в район КТЭЦ.

Данное мероприятие снижает поток реактивной мощности по линиям (в нормальном режиме), но расчет аварийного режима произвести не удается. Таким образом, делается вывод, что устойчивость энергосистемы нарушается и, значит, рассмотренное мероприятие ожидаемого эффекта не приносит.

Оценка эффективности установки дополнительной генерации

Как видно из предыдущих пунктов, мероприятия, связанные с продольно-поперечным регулированием индуктивных параметров линий, не позволяют предотвратить развитие аварии при отключении Линии 1 (500 кВ) и Линии 2 (220 кВ) в слабом сечении энергосистемы. Другой способ предотвращения развития аварии связан с загрузкой генераторов электрических станций.

В рассматриваемом районе сети имеется несколько электрических станций, которые в исследуемом режиме работают не на полную мощность. В частности, на КТЭЦ-3 из шести блоков в работе находятся пять, соответственно имеется некоторый резерв активной мощности.

Расчеты показали, что увеличение загрузки КТЭЦ-3 с 288 до 270 МВт позволяет сохранить работоспособность энергосистемы при аварийном отключении ВЛ 500 кВ и ВЛ 220 кВ. При этом значения напряжений на некоторых подстанциях оказываются ниже номинальных (217, 215 кВ и т. д.).

В действительности ресурсы регулирования отсутствуют, и для дополнительной выработки активной мощности нужно искать резервы на других электрических станциях. Тем не менее



увеличение активной мощности в рассматриваемом районе положительно сказывается на показателях режима электрической сети.

Вблизи КТЭЦ, в соседней энергосистеме, находится достаточно мощная станция (ЧГЭС), которая имеет установленную мощность 1400 МВт. При возникновении рассматриваемой аварии в энергосистеме возможна дополнительная загрузка генераторов ЧГЭС. В этом случае для сохранения нормальной работы исследуемой энергосистемы выработку активной мощности на ЧГЭС необходимо увеличить на 280 МВт.

Видно, что месторасположение точки присоединения источника дополнительной активной мощности практически не влияет на устойчивость энергосистемы. Сеть позволяет передать дополнительную мощность даже из соседних энергорайонов.

Оценка эффективности сооружения дополнительной линии

Другим вариантом борьбы с аварией при отключении ВЛ 500 кВ является сооружение дополнительной линии ВЛ 220 кВ в слабом сечении энергосистемы. Так при отключении линии 500 кВ мощность по каждой цепи линии 220 кВ будет составлять $(301+j51)$ МВА. Такое значение потока мощности находится на грани предельно допустимого: любое возмущение в сети может привести к отключению сразу двух линий, что недопустимо.

Выходом из данной ситуации может быть сооружение третьей цепи линии ВЛ 220 кВ. Но данное решение — весьма затратное, и, кроме того, может отсутствовать техническая возможность подключения двух линий к существующим подстанциям.

Вместо строительства двух дополнительных цепей линий 220 кВ более простое решение состоит в сооружении только одной дополнительной линий 220 кВ с установкой продольных реакторов в каждую из параллельных линий 220 кВ. Так, при сопротивлении каждого реактора 20 Ом поток по линиям в рассматриваемом аварийном режиме снижается до $(283+j18)$ МВА, что на 6 % меньше.

Дополнительное сетевое строительство — традиционный и основной способ увеличения пропускной способности слабых сечений. Надежность энергосистемы при таком способе возрастает за счет увеличения пропускной способности межсистемных связей и увеличения числа параллельных линий. Однако данный способ — самый дорогой среди рассмотренных.

Проведенное расчетное исследование привело к следующим выводам:

1. В энергосистеме имеется слабое сечение, в которое включены линии между подстанциями 500 кВ. Связь осуществляется всего по двум линиям — ВЛ 500 кВ и ВЛ 220 кВ.

2. Аварийное отключение линии ВЛ 500 кВ влечет за собой перегрузку параллельной линии ВЛ 220 кВ, что приводит к ее отключению.

3. Рассмотренные противоаварийные мероприятия, основанные на регулировании индуктивных параметров сети, показали, что подключение источников реактивной мощности и установка продольных реакторов не являются достаточно эффективными мероприятиями.

4. Действенным методом по предотвращению аварийной ситуации оказывается увеличение генерации активной мощности вблизи КТЭЦ. При этом место установки дополнительной генерации мало влияет на результат, что обусловлено надежностью связи рассматриваемого энергорайона со всей энергосистемой.

5. В целом можно отметить, что основной причиной развития аварийной ситуации в энергосистеме при ослаблении слабого сечения является дефицит активной мощности, и дополнительные средства регулирования реактивной мощности не позволяют предотвратить развитие аварии без отключения потребителей. Поскольку рассмотренный дефицитный район энергосистемы находится в окружении мощных подстанций сети 500 кВ, то наряду со строительством дополнительных генераторных мощностей эффективным способом по предотвращению развития аварии может стать строительство дополнительных линий электропередачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Идельчик, В.И.** Электрические системы и сети [Текст]: учебник для вузов / В.И. Идельчик.— М.: Энергоатомиздат, 1989.— С. 398–429.
2. Электрические системы Т. 2. Электрические сети [Текст]: Учеб. пособие для электроэнергетических вузов / Под ред. В.А. Веникова.— М.:

Высшая школа, 1971.— С. 206–207.

8. Евдокуин, Г.А. Электрические системы и сети [Текст]: Учеб. пособие для студ. электроэнерг. спец. вузов / Г.А. Евдокуин.— СПб.: Изд-во М.П. Сизова, 2004.— 304 с.

9. Беляев, А.Н. Основы переходных процессов в электроэнергетических системах [Текст]:

Метод. указ. по курс. проек. / А.Н. Беляев, С.Е. Герасимов, Р.В. Окороков, Г.А. Першиков, С.В. Смоловик, В.С. Чудный.— СПб.: СПбГПУ, 2007.— 36 с.

10. Методические рекомендации по проектированию развития энергосистем СО [Текст] / ЕС России.— 153-34.20.118—2003.

УДК 621.165

А.А. Епифанов, А.И. Кириллов, В.А. Рассохин

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОПАТОЧНЫХ РЕШЕТОК МАЛОРАСХОДНЫХ ТУРБИН

По определению малорасходные турбины расходуют малое количество рабочего тела, соответственно малы проходные сечения их проточной части. При традиционной конструкции таких турбин приходится не только применять чрезмерно короткие лопатки, но и вводить малую степень парциальности, что приводит к резкому снижению КПД. Для того чтобы решить задачу создания экономичной малорасходной турбины, потребовалось пересмотреть принципиальные вопросы проектирования проточной части.

Созданием экономичных малорасходных турбин на кафедре турбинных двигателей и установок (ТДУ) Ленинградского политехнического института (ЛПИ) в 70-х годах прошлого века начала заниматься группа сотрудников под руководством профессора И.И. Кириллова. В резуль-

тате многолетних исследований был разработан новый класс малорасходных высоконагруженных сверхзвуковых турбинных ступеней конструкции ЛПИ [1,2].

Эти турбины разработки ЛПИ имеют конструктивные особенности лопаточного аппарата (рис. 1), отличающие их от турбин традиционного типа:

малые углы выхода сопловой решетки ($\alpha_{1L} = 3\text{--}9^\circ$);

малые углы входа рабочей решетки ($\beta_{1L} = 6\text{--}14^\circ$);

большие углы поворота потока в рабочей решетке ($\theta_2 = 160\text{--}170^\circ$);

безразмерный шаг сопловой и рабочей решеток ($t/B > 1,2$).

В основе разработанного класса малорасходных турбин ЛПИ лежат результаты многолетних

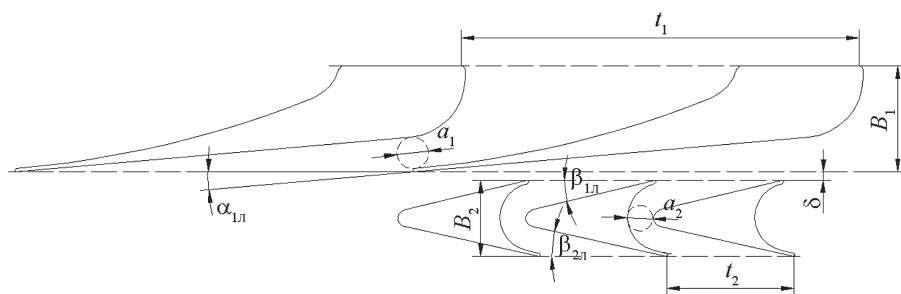


Рис. 1. Схема осевой ступени конструкции ЛПИ:
 B — ширина решетки; t — шаг решетки; a — горло межлопаточного канала;
 α_L , β_L — геометрические углы; δ — межвенцевой зазор
(индекс 1 относится к сопловой решетке; индекс 2 — к рабочей решетке)



стендовых исследований, которые продолжаются на кафедре ТДУ и сегодня [3]. Анализ и обработка экспериментальных данных позволили создать основанный на одномерных представлениях о течении программный комплекс оптимального проектирования малорасходных проточных частей и профилирования лопаточных аппаратов.

Вместе с тем стендовые испытания — не единственный способ отработки проточных частей турбин. Достигнутые за последние годы успехи в развитии вычислительной гидродинамики позволяют ставить вопрос о существенном сокращении доли экспериментальных и доводочных работ при конструировании решеток и ступеней турбомашин. Например, многократно апробированный и удобный для пользователя программный комплекс вычислительной гидродинамики ANSYS CFX, ориентированный, в частности, на численное моделирование течения в проточных частях турбомашин, позволяет в короткие сроки и с относительно небольшими трудозатратами получить детальную информацию о структуре течения в ступени и ее интегральных характеристиках.

Цель и задачи исследования. Поскольку лопаточные решетки малорасходных турбин ЛПИ существенно отличаются от решеток традиционного типа, методика их численного моделирования может не совпадать с методикой [4], рекомендованной для турбинных решеток традиционного типа.

Цель работы — настроить программный комплекс ANSYS CFX для решения задачи обтекания лопаточных решеток малорасходных турбин. При этом локальные и интегральные характеристики таких решеток должны рассчитываться с приемлемой для инженерных целей точностью.

Для достижения указанной цели необходимо:

исследовать свойства программного комплекса ANSYS CFX применительно к моделированию течения в решетках малорасходных турбин;

сформулировать рекомендации по выбору комплекта вычислительных опций, обеспечивающих приемлемую точность результатов моделирования;

проводить верификацию расчетов малорасходных сопловых и рабочих решеток в широком диапазоне изменения чисел Маха по данным стендовых испытаний.

В практике трехмерных расчетов турбин традиционного типа получил широкое распространение RANS-подход к моделированию турбулентных течений [5]. При использовании этого подхода решаются осредненные по Рейнольдсу стационарные или нестационарные уравнения Навье — Стокса, замкнутые моделью турбулентности. Этот подход наиболее экономичен с точки зрения вычислительных ресурсов и позволяет с удовлетворительной точностью моделировать течение во многих задачах гидродинамики. Однако универсальной модели турбулентности не существует, и для расчета течения в решетках малорасходных турбин необходимо подобрать подходящую модель турбулентности.

Хорошо себя зарекомендовала для численного моделирования течения в турбомашинах модель переноса сдвиговых напряжений SST—CC с поправкой на кривизну линий тока [6], что особенно актуально для решеток с большими углами поворота потока. Эта модель в зависимости от типа расчетной сетки может быть высокорейнольдсовой (воспроизводится область развитого турбулентного течения, а трение на стенке определяется с помощью пристенных функций) или низкорейнольдсовой (ведется расчет всей области течения, включая вязкий подслой).

Для низкорейнольдсовой версии модели SST—CC сетка вблизи стенки должна быть гораздо более подробной, чем для высокорейнольдсовой. Следовательно, вопрос моделирования турбулентности должен решаться в тесной связи с выбором подходящей сетки.

Решетки сопловых лопаток. Рассмотрим численное моделирование турбулентного трехмерного течения в кольцевых малорасходных сопловых решетках на примере венца с геометрическим углом выхода $4,75^\circ$ и безразмерным шагом 5,5. Эта решетка рассчитывалась в широком диапазоне чисел Маха с помощью RANS-подхода на четырех расчетных сетках:

грубой (50 тыс. узлов) и умеренно подробной (140 тыс. узлов) для моделирования турбулентности с помощью высокорейнольдсовой версии модели SST—CC;

умеренно подробной (700 тыс. узлов) и подробной (1 500 тыс. узлов) для моделирования турбулентности с помощью низкорейнольдсовой версии модели SST—CC.

Полученное в результате расчета поле скорости в среднем сечении решетки для сверхзвукового режима обтекания представлено на рис. 2.

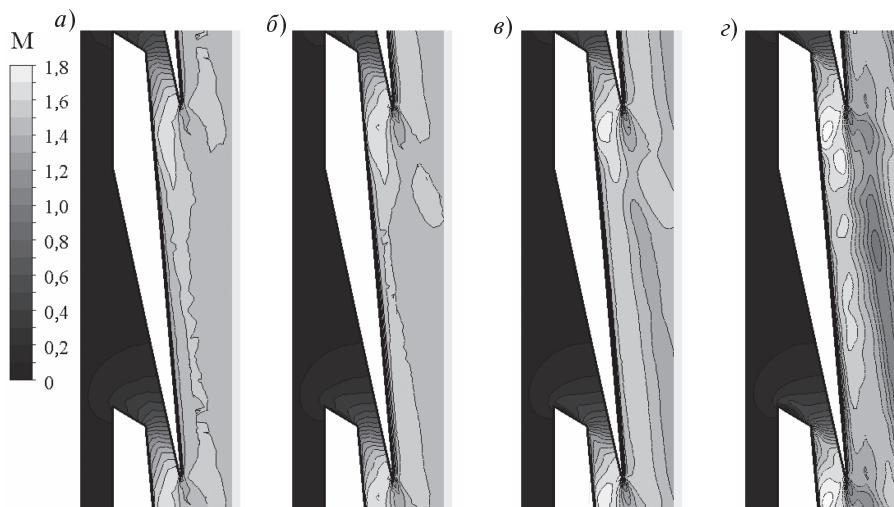


Рис. 2. Поля чисел Маха на модели с различными сетками на режиме $M_{1t} = 1,6$:
 а — грубая высокорейнольдсовая сетка (50 тыс. узлов);
 б — умеренно подробная высокорейнольдсовая сетка (140 тыс. узлов);
 в — умеренно подробная низкорейнольдсовая сетка (700 тыс. узлов);
 г — подробная низкорейнольдсовая сетка (1 500 тыс. узлов)

В целом поле скорости слабо зависит от размера расчетной ячейки и версии модели турбулентности. Отметим лишь отчетливо видимое повышение детализации распределения скоростей по мере измельчения расчетной сетки.

Перейдем к оценке эффективности решетки. При вычислении коэффициента полных потерь расчетные параметры потока осреднялись в контрольных сечениях по полному импульсу, как это обычно делается и при обработке опытных дан-

ных для лопаточных решеток. Контрольные сечения были выбраны на расстоянии горла от входного фронта решетки и на расстоянии половины горла от ее выходного фронта. Вычисленный таким образом коэффициент полных потерь верифицировался (рис. 3) по данным стендовых испытаний.

Расчет в целом отражает характер изменения потерь с увеличением числа Маха. В области чисел $M_{1t} \approx 0,8$ экспериментальные точки лежат

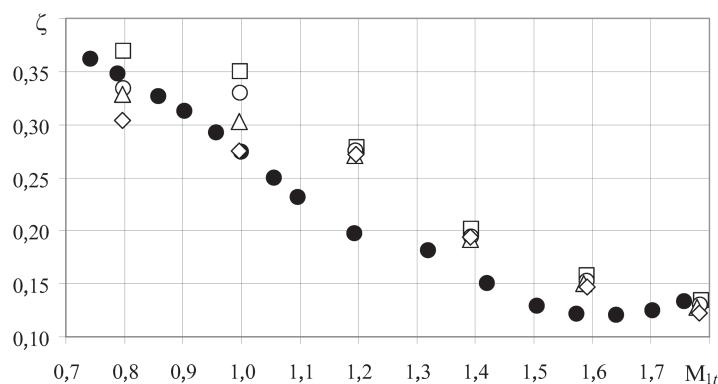


Рис. 3. Зависимость коэффициента потерь в кольцевой сопловой решетке от числа Маха

- (● — экспериментальные данные;
- — высокорейнольдсовая сетка (50 тыс. узлов);
- — высокорейнольдсовая сетка (140 тыс. узлов);
- △ — низкорейнольдсовая сетка (700 тыс. узлов);
- ◇ — низкорейнольдсовая сетка (1 500 тыс. узлов))



в зоне результатов, рассчитанных с помощью CFX. Значения потерь, полученные расчетом на грубой сетке, завышены по сравнению с опытными во всем диапазоне чисел Маха. Наибольшее рассогласование расчетных и опытных данных имеет место при $M_{1t} \approx 1,2$, где экспериментальная точка, по-видимому, несколько занижена. Расхождение между расчетными значениями коэффициентов потерь снижается по мере увеличения числа Маха, одновременно снижается разница между данными расчетов и опыта.

В среднем к опытным наиболее близки значения коэффициента потерь, вычисленные с применением низкорейнольдсовой модели турбулентности и состоящей из 700 тыс. узлов расчетной сетки. Однако, учитывая, что время расчета при низкорейнольдсовой модели турбулентности во много раз больше, чем при высокорейнольдсовой, а разница в результатах совсем невелика, малорасходные сопловые решетки допустимо рассчитывать с помощью высокорейнольдсовой версии модели турбулентности SST-CC, используя экономичные в отношении времени расчета умеренно подробные сетки.

Исследования двух других сопловых решеток (первая из них имеет геометрический угол выхода 3° и безразмерный шаг 4,4, вторая — геометрический угол выхода $3,5^\circ$ и безразмерный шаг 8,7) подтвердили это заключение.

Решетки рабочих лопаток. На стенде кафедры ТДУ малорасходные рабочие решетки испытывались в составе ступени. Стенд оснащен контрольно-измерительными приборами для траверсирования потока в среднем по высоте сечения кольцевой рабочей решетки. По данным траверсирования были вычислены экспериментальные значения коэффициентов профильных потерь в рабочей решетке.

Условия проведения стендовых испытаний решеток рабочих лопаток были воспроизведены в программном комплексе ANSYS CFX. Моделирование стендовых испытаний позволило, во-первых, провести верификацию результатов расчета потерь в рабочих решетках по экспериментальным данным и, во-вторых, оценить влияние входной неоднородности потока и нестационарности течения на коэффициент профильных потерь в рабочей решетке.

Предварительно вопросы выбора подходящих для расчета рабочих решеток подхода к модели-

рованию, размера вычислительных сеток и модели турбулентности отрабатывались в двумерной постановке на трех решетках: 1) с геометрическим углом входа 8° , безразмерным шагом 1,5 и геометрическим углом выхода 8° ; 2) с геометрическим углом входа 11° , безразмерным шагом 1,15 и геометрическим углом выхода 12° ; 3) с геометрическим углом входа 14° , безразмерным шагом 1,16 и геометрическим углом выхода 15° .

В этой предварительной серии расчетов на вход в решетку поступал поток с однородным полем скорости, а в качестве граничных условий были выбраны постоянные вдоль шага решетки давление и температура торможения на входе в расчетную область и статическое давление при выходе из нее. По результатам исследований сделан вывод, что, как и в случае сопловых решеток, инженерный расчет решеток рабочего колеса можно проводить, используя RANS-подход, высокорейнольдсовую версию модели турбулентности и умеренно подробные сетки.

Сопряжение течения в решетках соплового аппарата (в абсолютном движении) и рабочего колеса (в относительном движении) выполнялось способом Frozen Rotor. Этот способ не учитывает фактора нестационарности течения, однако позволяет сформировать перед решеткой рабочего колеса неоднородный в окружном направлении поток, близкий к условиям натурного течения. Для оценки дополнительного влияния нестационарности были проведены расчеты способом Transient Rotor Stator [7].

Рассмотрим поля коэффициентов потерь в среднем по высоте сечения рабочей решетки при обтекании ее однородным и неоднородным потоком (рис. 4). Видно, что за точкой максимальной кривизны выпуклой поверхности профиля при однородном потоке формируется более интенсивный отрыв, чем при неоднородном. Однако под влиянием входной неоднородности потока возрастает локальный коэффициент потерь в зоне пограничного слоя на выпуклой поверхности входной части рабочей лопатки начиная с входной кромки, а также увеличиваются потери в ядре канального течения. С выходной кромки рабочей решетки при неоднородном входном потоке сходит более интенсивный след.

Результаты расчета суммарного коэффициента профильных потерь и верификация расчета по данным эксперимента в зависимости от числа Маха приведены на рис. 5.

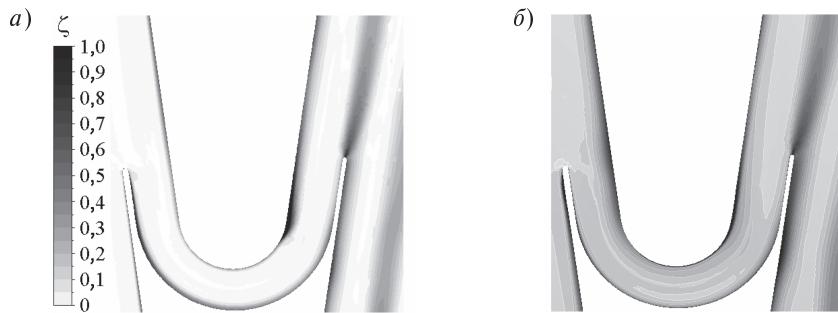


Рис. 4. Локальный коэффициент потерь в среднем сечении рабочей решетки на режиме $M_{2t} = 1,7$ при однородном (а) и неоднородном потоке на входе (б)

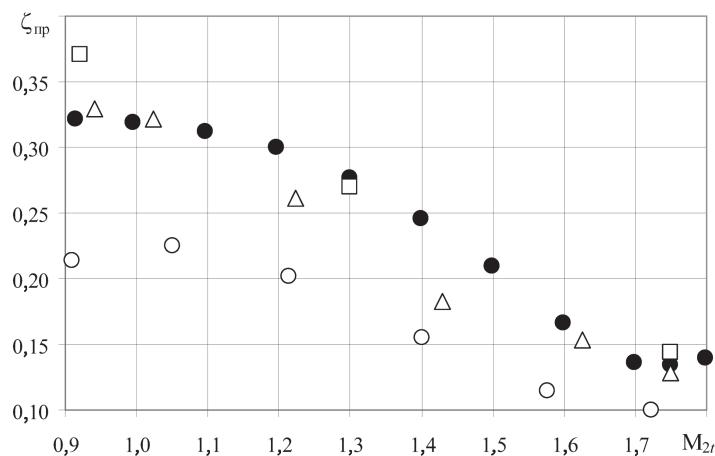


Рис. 5. Суммарный коэффициент профильных потерь в рабочей решетке от M_{2t}

(● — экспериментальные данные; ○ — однородный поток на входе в решетку;
 △ — неоднородный поток на входе в решетку;
 □ — потери с учетом нестационарности)

Неоднородность потока, создаваемая сопловыми лопатками, приводит к существенному росту потерь в рабочей решетке. На дозвуковых и трансзвуковых режимах разница в потерях составляет 0,06–0,10, на сверхзвуковых режимах — около 0,04 (см. рис. 5). С учетом потерь от неоднородности входных параметров экспериментальные и расчетные данные согласуются удовлетворительно. Дополнительные потери от нестационарности, расчет которых требует весьма больших затрат вычислительного времени, для рассмотренного класса решеток рабочего колеса сравнительно невелики, и при оценке коэффициентов потерь их в первом приближении можно не учитывать.

В работе проведен анализ возможностей программного комплекса ANSYS CFX применительно к моделированию трехмерного течения в решетках сопловых и рабочих лопаток мало-расходных турбин ЛПИ.

Достоверность расчетных значений коэффициентов профильных потерь в сопловых и рабочих решетках подтверждена сравнением их с данными стендовых испытаний.

Показано, что при использовании RANS-подхода и высокорейнольдсовской версии модели турбулентности SST–CC на умеренно подробных расчетных сетках интегральные характеристики решеток рассчитываются с приемлемой для инженерных целей точностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кириллов, И.И.** Выбор оптимальных геометрических параметров осевых малорасходных турбин [Текст] / И.И. Кириллов, Л.С. Гринкруг, О.Е. Куприянов, В.А. Рассохин // Научные проблемы современного энергетического машиностроения и их решение: Тез. докл. Всесоюзной научно-технической конф. (28–29 января 1987 г.).— Л., 1987.— С. 118–119.
2. **Рассохин, В.А.** Турбины конструкции ЛПИ: преимущества, характеристики, опыт разработки и применение [Текст] / В.А. Рассохин // Энергомашиностроение. Труды СПбГПУ.— № 491. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004.— С. 152–161.
3. **Беседин, С.Н.** Стенд для исследования высокогооборотных модельных ступеней малорасходных турбин конструкции ЛПИ [Текст] / С.Н. Беседин, Н.А. Забелин, Ю.В. Матвеев [и др.] // Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке: Материалы XVII Междунар. научно-метод. конф. 11–12 февраля 2010 года, СПб.— Том 1.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.— С. 118–119.
4. **Галаев, С.А.** Численное моделирование течения вязкого газа в решетках осевых турбомашин: методика и результаты применения современных программных средств [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук / С.А. Галаев.— СПб., 2006.— 166 с.
5. **Смирнов, Е.М.** Течения вязкой жидкости и модели турбулентности: методы расчета турбулентных течений [Текст] / Е.М. Смирнов, А.В. Гарбакук.— СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2007.— 127 с.
6. **Smirnov, P.E.** Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart-Shur correction term [Текст] / P.E. Smirnov, F.R. Menter // ASME.— Paper (GT2008-50480).— 2008.— P. 1–8.
7. **Епифанов, А.А.** Расчет трехмерного течения в ступенях малорасходных турбин [Текст] / А.А. Епифанов, А.И. Кириллов, В.А. Рассохин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование.— 2012. № 1 (142).— С. 65–70.

УДК 621.311.22

Г.В. Василенко, Н.Т. Амосов

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ СЕТЕВЫХ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГОБЛОКА Т-180-130 И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СНИЖЕНИЮ ИХ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ

Почти сорокалетний опыт эксплуатации горизонтальных сетевых подогревателей ПСГ-5000 турбоустановок Т-250/300-240 ТМЗ, оснащаемых трубной системой из аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т, свидетельствует о систематических повреждениях трубных пучков ПСГ-2 и подтверждает склонность стали к коррозионному растрескиванию под напряжением [11]. Это приводит к необходимости массового глушения трубок либо их полной замены. По данным [1, 7, 10] замена трубных пучков подогревателей осуществляется через 5–9 лет. Наработка ПСГ-2 до первых повреждений составляет 12–15 тыс. часов, а массовое разрушение наступало, например, на Южной ТЭЦ Санкт-Петербурга через 20 тыс. ч, на ТЭЦ-22 Моск-

вы — через 24 тыс. ч, в Киеве на ТЭЦ-5 — через 38 тыс. ч и ТЭЦ-6 — через 30 тыс. ч.

В 2006 году на Правобережной ТЭЦ ОАО «ТГК-1» был введен в эксплуатацию энергоблок с турбоустановкой Т-180/210-130 производства ЛМЗ, которая оснащена аналогичными сетевыми подогревателями ПСГ-5000. И уже в первый период эксплуатации в ПСГ-2 пришлось заглушить значительное количество трубок для предотвращения присосов сетевой воды в цикл энергоустановки.

Повреждения обычно наблюдаются с паровой стороны. Трещины, расположенные по длине трубок (между трубными досками), имеют, как правило, межкристаллитный характер и ветвистый вид «паука», а трещины в районе труб-

ных досок — транскристаллитный характер и расположены поперек трубок. Редко наблюдаются косые трещины под углом к продольной оси трубок.

Причины возникновения трещин межкристаллитного характера рассматривались в многочисленных работах ВТИ, МЭИ, ЦКТИ и других организаций, в то время как причины образования сквозных поперечных трещин и их локализации в районе трубных досок практически не изучены. Настоящая статья и призвана ликвидировать существующий пробел.

Повреждения трубок ПСГ-2 турбоустановок Т-250/300-240

Анализ характера повреждений и условий их возникновения свидетельствует о следующем:

1. Температура металла трубок существенно влияет на скорость процесса растрескивания под напряжением [6]. Поэтому максимальная повреждаемость трубок наблюдается в ПСГ-2, а в пределах аппарата — в последнем, четвертом ходе сетевой воды. Локальное увеличение теплового потока в зоне паропусков (четвертый ход) приводит к дополнительному повышению температуры металла примерно в четырех рядах периферийных трубок и интенсификации их повреждений в этой зоне.

2. Растрескивание аустенитной нержавеющей стали происходит в результате совместного воздействия механических напряжений и коррозионной среды.

Наихудшая компенсация температурных расширений и максимальные растягивающие напряжения характерны для горизонтальных подогревателей ПСГ-5000 с фиксированными трубными досками, а наилучшая компенсация — в подогревателях ПНД с U-образными трубками из аналогичной стали. В подогревателях с U-образными трубками повреждения отсутствуют.

Появление коррозионной среды возможно при конденсации пара из-за интенсивного перехода коррозионно-агрессивных примесей из пара в образующийся конденсат, прежде всего в его первые порции — так называемый *первоначальный конденсат*, в котором примеси максимально концентрированы.

Наиболее негативным коррозионным агентом считаются хлориды. Однако их влияние оценивается неоднозначно по следующим причинам [1]:

во-первых, влияние хлоридов может наблюдаться только в кислой среде;

во-вторых, это влияние фиксируется при превышении некоторой минимальной — *критической* — концентрации ($10 \text{ мг}/\text{дм}^3$ и более в зависимости от температуры). Однако данные промышленных исследований свидетельствуют, что фактическая концентрация хлоридов в первоначальном конденсате существенно ниже критического значения и не превышает $0,1 \text{ мг}/\text{дм}^3$;

в-третьих, в сетевой воде содержание хлоридов более чем на два порядка превышает их концентрацию в первоначальном конденсате, вместе с тем повреждения трубок ПСГ-5000 происходят преимущественно с паровой стороны, а не с водяной.

3. Более существенно влияние показателя pH образующегося конденсата, поскольку прочностные характеристики нержавеющей стали ухудшаются при значениях pH менее 7,0, т. е. в кислой среде [2].

С повышенным содержанием органических соединений в источнике водоснабжения связывают, например, значительную повреждаемость трубных систем ПСГ-2 на энергоблоках ТЭЦ-22 и ТЭЦ-26 Мосэнерго [10, 3, 8]. Водоснабжение и подпитка этих энергоблоков осуществляются от водозаборов Москвы-реки, расположенных ниже сбросов в нее городских и производственных сточных вод. Наличие в исходной воде органических веществ, которые с трудом задерживаются системой фильтров на электростанции, приводит в результате их термолиза при высокой температуре к образованию органических кислот (уксусная, муравьиная и др.). Поступая с паром в сетевой подогреватель, органические кислоты и обусловливают пониженные значения pH конденсата, образующегося на трубках при конденсации пара.

С другой стороны, на ТЭЦ-21 и ТЭЦ-23, водозабор которых расположен выше сброса сточных вод в Москву-реку, не было случаев существенной повреждаемости трубок ПСГ-2.

4. При превалирующем (над напряжением) влиянии коррозионной среды возникающие трещины имеют ветвистый — межкристаллитный — характер. Подобные трещины наблюдаются обычно по всей длине трубок.

Если же растягивающие напряжения превалируют над коррозионной средой, то трещины развиваются в поперечном направлении и име-



ют транскристаллитный характер без значительной разветвленности.

Достаточно редкая разновидность транскристаллитного разрушения — трещины, направленные под углом к продольной оси трубы — по плоскостям скольжения [12].

На ТЭЦ-22 Мосэнерго, неблагополучной по качеству воды водоисточника, отмечены [10, 8] все три типа повреждений:

по длине трубок — трещины типа «паук»;

у трубных досок на расстоянии до 200 мм — поперечные трещины протяженностью до 7 мм, расположенные со стороны противоположной натеканию пара;

косые трещины под углом около 10° к оси трубы, длиной до 20 мм — со стороны натекания пара.

Повреждения трубок ПСГ-2 турбоустановки Т-180/210-130

Трубный пучок сетевого подогревателя ПСГ-5000-3,5-8-2 изготовлен из аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т и включает 7100 трубок диаметром 25×1 мм, длиной 9000 мм, фиксируемых в трубных досках вальцовкой.

Схема ПСГ-2 имеет особенность, заключающуюся в том, что подогреватель не отключается по пару — соответствующие задвижки не предусмотрены проектом. Кроме того, для так называемого режима «консервации» (т. е. при отключении ПСГ-2 по сетевой воде) заводом-изготовителем установлен чрезвычайно низкий расход сетевой воды — примерно 5 т/ч (через байпасную линию диаметром 20 мм у запорного клапана на входе в ПСГ-2).

Энергоблок оснащен блочной обессоливающей установкой, благодаря чему качество пара стабильно отвечает нормативным требованиям. Согласно результатам специально проведенного исследования величина pH первоначального конденсата при влажности 5 % также имеет благоприятное щелочное значение 8,6.

Вместе с тем уже в первый период эксплуатации (8000 часов) потребовалось заглушить значительное количество трубок в четвертом и третьем ходах ПСГ-2 для предотвращения присосов сетевой воды в цикл энергоблока.

Анализ ситуации за этот период времени показывал, что предположение о повреждении металла трубок приходилось исключить по следующим причинам:

1. Согласно статистическим данным по эксплуатации аналогичных подогревателей на турбоустановках Т-250/300–240 латентный период накопления микроповреждений в металле трубок (в результате коррозии под напряжением) имеет существенно большую продолжительность, и первые визуально наблюдаемые случаи растрескивания трубок фиксируются лишь через 12–15 тыс. часов.

2. Формуляр глушения трубок свидетельствовал о существенном отличии картины от соответствующих данных по энергоблокам Т-250: в то время как на энергоблоках Т-250 имеет место достаточно четкая локализация повреждений в нескольких периферийных рядах трубок четвертого хода в районе паровпусков, в ПСГ-2 энергоблока Т-180 в зоне паровпусков повреждения отсутствовали, а заглушенные трубы достаточно равномерно располагались по сечению четвертого и третьего ходов.

3. Результаты оценочного расчета растягивающих напряжений в металле трубок четвертого хода при работе подогревателя свидетельствуют, что напряжения находятся на низком уровне (порядка $560 \text{ кгс}/\text{см}^2$) по сравнению с пределом текучести $2200 \text{ кгс}/\text{см}^2$ и тем более с временным сопротивлением на разрыв ($5400 \text{ кгс}/\text{см}^2$). Поэтому трудно ожидать, чтобы статические усилия в трубках при работе аппарата могли привести к их растрескиванию и тем более к разрыву.

4. Специально выбитая из четвертого хода подогревателя (ранее заглушенная) трубка в периферийной части трубного пучка не имела повреждений.

Исходя из изложенных фактических данных было высказано предположение о том, что причину нарушения гидравлической плотности ПСГ-2 следует искать в развалцовке соединений трубок с трубными досками.

Опыт эксплуатации теплообменных аппаратов показывает, что при стационарном режиме обеспечивается длительная работоспособность вальцовочных соединений.

Вместе с тем при эксплуатации подогревателей возможны нестандартные ситуации, которые могут приводить к развалцовке трубных пучков. Известно, например, что чрезмерно быстрый прогрев подогревателей при пуске может приводить к развитию высоких напряжений и разуплотнению вальцовочных соединений.



Приведем характерное суждение, сформулированное в работе [5]: «Статические усилия в трубках и вальцовочных соединениях существенно меньше предельно допустимых нагрузок, вызывающих разрыв трубок или разгерметизацию вальцовочных соединений. Однако при достаточном числе циклов знакопеременных нагрузок гарантировать сохранение герметичности вальцовочных соединений невозможно».

В последующий период эксплуатации ПСГ-2 (ПСГ-5000) было зафиксировано появление сквозных поперечных трещин в трубках четвертого и третьего ходов в районе, непосредственно прилегающем к трубным доскам — на расстоянии до 150 мм.

Подобное явление, на наш взгляд, обусловлено тем, что при включении подогревателя в работу из режима «консервации» возникает тепловой (термический) «удар», при котором согласно закону сохранения импульса силы из-за скоротечности процесса в металле трубок должно развиваться значительное растягивающее напряжение, оно и может приводить к образованию трещин и разгерметизации вальцовочных соединений.

Действительно, в режиме «консервации» при регламентированном чрезвычайно низком расходе сетевой воды через ПСГ-2 (5 т/ч) четвертый ход подогревателя практически не заполнен водой, учитывая, что примерный расход воды через одну трубку при номинальном расходе составляет 6000 т/ч. При отсутствии отключающих задвижек и свободном поступлении пара в подогреватель трубы этого хода нагреваются до температуры греющего пара 150 °C.

При последующем включении подогревателя в работу вода из ПСГ-1 с температурой около 75 °C поступает в ПСГ-2 и при номинальном расходе за 20–30 секунд проходит весь подогрева-

тель, или за 5–6 секунд — четвертый ход, охлаждая его трубы примерно на 50 °C ($150^{\circ} - 100^{\circ} = 50^{\circ}$; здесь 100° — температура сетевой воды на выходе из ПСГ-2). При этом скорость охлаждения трубок оказывается экстремально высокой и составляет $50^{\circ}/5\text{сек} = 10^{\circ}/\text{сек}$, или $600^{\circ}/\text{мин} (!!!)$ при регламентируемом правилами темпе разогрева и охлаждения корпусов подогревателей, турбин и барабанов котлов $2-3^{\circ}/\text{мин}$.

Подчеркнем, что при этом изменяется и знак напряжений в материале трубок — вместо сжимающих напряжений в режиме «консервации» появляются растягивающие напряжения.

В результате накопления неупругих деформаций усталости под действием больших знакопеременных напряжений в металле появляются микротрещины, которые затем (по мере возрастания количества пусков) начинают интенсивно развиваться. Из таблицы видно, что глушение трубок четвертого хода приобретает лавинообразный характер при наработке более 20 тыс. часов (более 50 пусков). При каждом последующем останове для ликвидации прососов приходится заглушать десятки трубок, что свидетельствует об исчерпании их ресурса, а выведенная из работы поверхность теплообмена в этом ходе превышает допустимые 10 % и ограничивает расход сетевой воды через подогреватель. Эти обстоятельства диктуют необходимость замены трубок четвертого хода.

Можно полагать, что при включении подогревателя в работу подобные знакопеременные напряжения испытывают и трубы третьего хода, поскольку наблюдается нарушение плотности их вальцовочных соединений с трубными досками и образование трещин в трубах.

Трубкам первого хода присущи минимальные изменения температуры и они всегда — как

Показатели, характеризующие исчерпание ресурса трубок в четвертом ходе ПСГ-2

Название параметра	Значения параметра, зафиксированные при остановах ПСГ для ликвидации отсосов в течение двух лет					
	1.08.2008	12.10.2009	12–24.04.2010	16.05.2010	9.08.2010	12.10.2010
Количество трубок:						
новых	17	27	14	50	29	57
всего	17	44	58	108	137	194
Наработка, час.	8223	16627	20319	20779	22387	23531
Количество пусков	29	30	53	54	59	63



при работе, так и в режиме «консервации» — подвержены растягивающим напряжениям, причем достаточно близким по величине: соответственно 1220 и 900 кгс/см². Поэтому для трубного пучка первого хода не характерны рассмотренные выше дефекты.

Если исходить из изложенных представлений о механизме повреждений, то для предупреждения нарушений плотности вальцовочных соединений и появления трещин в трубах возле трубных досок следует максимально увеличить расход сетевой воды через ПСГ-2 в режиме «консервации». Данная рекомендация позволит исключить саму возможность экстремального повышения температуры трубок при этом режиме (и последующего резкого ее снижения при включении подогревателя в работу).

Специфическая проблема образования попечных трещин возле трубных досок требует специального рассмотрения. Однако можно полагать, что в зонах, непосредственно прилегающих к трубным доскам, т. е. к жесткому защемлению трубок, существуют условия «стесненных деформаций элементов сечений труб» [4], вследствие чего эти зоны максимально воспринимают повышенные и тем более динамически воздействующие напряжения (в отличие от последующих протяженных участков трубок, где обеспечивается возможность увеличения деформаций).

Выводы и рекомендации

1. Обобщение длительного опыта эксплуатации сетевых подогревателей ПСГ-5000 с трубной системой из austenитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т подтверждает, что данная сталь склонна к коррозионному растрескиванию под напряжением.

2. При превалирующем влиянии коррозионного фактора растрескивание металла имеет

межкристаллитный, ветвистый характер типа «паук» и наблюдается по всей длине трубок (первые повреждения наблюдаются через 12–15 тыс. часов, массовые — через 20–25 тыс. часов). Такой тип повреждений наиболее характерен. Для его предупреждения перспективно применение austenito-ферритной стали, существенно более стойкой против коррозионного растрескивания под напряжением [9].

3. Если решающее значение имеет уровень напряжений, то образуются поперечные трещины транскристаллитного характера в зоне фиксации трубок в трубных досках — на участке до 150–200 мм.

При уровне напряжений, достигающем предела текучести металла, возможно нарушение гидравлической плотности вальцовочных соединений.

4. В ПСГ-2 энергоблока Т-180/210–130 нарушение гидравлической плотности вальцовочных соединений и образование трещин в трубах из austenитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т в районе трубных досок связаны с явлением тепловых «ударов». Тепловые «удары» возникают при включении подогревателя ПСГ-2 в работу из режима «консервации» (с крайне низким расходом сетевой воды — 5 т/ч). При этом скорость изменения температуры металла трубок четвертого хода достигает экстремально высоких значений — 600 град/мин (при регламентируемой скорости 2–3 °/мин).

5. Для предупреждения указанных явлений: следует изменить режим эксплуатации ПСГ-2, максимально увеличив расход сетевой воды через подогреватель в режиме его «консервации»;

целесообразна установка на трубопроводах греющего пара надежных отключающих задвижек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Василенко, Г.В.** Обеспечение надежности трубной системы сетевого подогревателя ПСГ-5000 [Текст] / Г.В. Василенко, И.М. Мещеряков // Теплоэнергетика.— 2010. № 1.— С. 40–44.

2. **Василенко, Г.В.** Химия воды и пара в энергетических установках тепловых электростанций [Текст] / Г.В. Василенко, В.И. Зарембо // СПб.: Стратегия, 2007.— 352 с.

3. **Лунин, И.А.** Влияние условий эксплуатации сетевых подогревателей турбин Т-250/300-23,5 ТМЗ

на ресурс их трубной системы [Текст] / И.А. Лунин, А.Д. Трухний, А.И. Лебедева [и др.] // Теплоэнергетика.— 2005. № 7.— С. 70–75.

4. **Гецов, Л.Б.** Термическая усталость и методы прогнозирования надежности конструкций при термическом нагружении [Текст]: Учебное пособие / Л.Б. Гецов.— СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2005.— 37 с.

5. **Бродов, Ю.М.** Выбор материала трубных систем теплообменных аппаратов паротурбинных

установок [Текст] / Ю.М. Бродов, К.Э. Аронсон, М.А. Ниренштейн [и др.] // Теплоэнергетика.—2003. № 5.— С. 50–55.

6. Греков, Н.А. Коррозионное растрескивание бандажных колец роторов турбогенераторов [Текст] / Н.А. Греков, Л.Б. Гецов // Труды ЦКТИ.—2002. Вып. 289.— С. 58–64.

7. Богачев, А.Ф. Причины коррозии сетевых подогревателей и мероприятия по ее предотвращению [Текст] / А.Ф. Богачев // Теплоэнергетика.—1999. № 12.— С. 13–19.

8. Петрова, Т.И. Исследование коррозии подогревателей сетевой воды ТЭЦ и пути ее снижения [Текст] / Т.И. Петрова, В.А. Рыженков, О.С. Ермаков [и др.] // Теплоэнергетика.—1999. № 12.— С. 20–23.

9. Shiro Haruyama. Stress corrosion cracking by cooling water of stainless steel shell and tube exchangers [Текст] / Haruyama Shiro // Material Performance.—March 1982.— P. 14–18.

10. Вайнман, А.Б. Исследование коррозионно-механического повреждения труб горизонтальных сетевых подогревателей турбин Т-250/300–240 [Текст] / А.Б. Вайнман, О.И. Мартынова, И.А. Малахов [и др.] // Теплоэнергетика.—1977. № 6.— С. 17–21.

11. Коррозия [Текст]: Справочник / Под ред. Л.Л. Шрайера; пер. с англ. // М.: Металлургия, 1981.

12. Долинский, Ф.В. Краткий курс сопротивления материалов [Текст] / Ф.В. Долинский, М.Н. Михайлов // М.: Высшая школа, 1988.

УДК 537.8:621.396.6

Н.В. Коробкин, В.С. Калашников, А.В. Кирпанев

ЦИЛИНДРИЧЕСКОЕ СКАНИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

Определение пространственно-временной структуры поля источника помехи относится к задачам электромагнитной совместимости (ЭМС) [1]. Источником помехи может быть любое электротехническое или радиотехническое устройство. Задачи такого типа относятся к так называемым обратным задачам [2]. В качестве примера можно привести размещаемые на борту летательного аппарата антенны различных радиотехнических систем, электроприводы и их схемы управления, генераторы несущей и промежуточной частот.

Определение электромагнитного поля источника помехи практически любой сложности может быть выполнено по измерениям некоторых составляющих напряженности на координатных поверхностях, пространственно замыкающих исследуемое устройство. Подобная практика используется при экспериментальном исследовании характеристик излучения антенн по измерениям в ближней зоне [3, 4]. При этом в зависимости от априорно известных направленных свойств антennы в качестве поверхности измерения используют плоскость, цилиндр или сферу. Аналогичный подход можно использовать

при определении поля исследуемого устройства (ИУ), рассматриваемого в качестве источника помехи.

При исследовании ЭМС в некоторых практических задачах определения внешних электромагнитных полей помехонесущих источников целесообразно использовать цилиндрическую поверхность измерения. В случаях, когда можно пренебречь влиянием вторичных и внешних полей, основными элементами цилиндрического сканера являются азимутальный поворотный стол, на котором размещено ИУ, и вертикальная стойка перемещения зонда по направляющей цилиндра [3].

В пространственно-временной области составляющие напряженностей электрического и магнитного полей ИУ в цилиндрических координатах (ρ, ϕ, z) определяются следующими равенствами [5]:

$$E_z(\rho, \phi, z, t) = \\ = \frac{1}{c} \sum_{n=-N_g}^{N_g} e^{in\phi} \int_{\omega_q \leq |\omega| \leq \omega_{\max}} \int_{-1}^1 \frac{\omega^3}{c^2} (1 - h^2) b_n(\varpi) \times$$



$$\times H_n^{(2)}(\chi\rho) e^{-i\varpi z} e^{i\omega t} dh d\omega; \quad (1)$$

$$E_\rho(\rho, \phi, z, t) =$$

$$= \frac{1}{c} \sum_{n=-N_g}^{N_g} e^{in\phi} \int_{\omega_q \leq |\omega| \leq \omega_{\max}} \int_{-1}^1 \left(\frac{\mu n \omega^3}{\rho} \left(a_n \left(\frac{\omega}{c} h \right) H_n^{(2)}(\chi\rho) + i \varpi \omega b_n(\varpi) \frac{\partial}{\partial \rho} H_n^{(2)}(\chi\rho) \right) \right) e^{-i\varpi z} e^{i\omega t} dh d\omega; \quad (2)$$

$$E_\phi(\rho, \phi, z, t) =$$

$$= -\frac{1}{c} \sum_{n=-N_g}^{N_g} e^{in\phi} \int_{\omega_q \leq |\omega| \leq \omega_{\max}} \int_{-1}^1 \left(j \mu \omega^2 \left(a_n(\varpi) \frac{\partial}{\partial \rho} H_n^{(2)}(\chi\rho) - \frac{n \omega^2}{c \rho} h b_n(\varpi) H_n^{(2)}(\chi\rho) \right) \right) e^{-i\varpi z} e^{i\omega t} dh d\omega; \quad (3)$$

$$H_z(\rho, \phi, z, t) =$$

$$= \frac{1}{c} \sum_{n=-N_g}^{N_g} e^{in\phi} \int_{\omega_q \leq |\omega| \leq \omega_{\max}} \int_{-1}^1 \frac{\omega^3}{c^2} (1-h^2) a_n(\varpi) \times \times H_n^{(2)}(\chi\rho) e^{-i\varpi z} e^{i\omega t} dh d\omega; \quad (4)$$

$$H_\rho(\rho, \phi, z, t) =$$

$$= -\frac{1}{c} \sum_{n=-N_g}^{N_g} e^{in\phi} \int_{\omega_q \leq |\omega| \leq \omega_{\max}} \int_{-1}^1 \left(\varpi \omega a_n(\varpi) \frac{\partial}{\partial \rho} H_n^{(2)}(\chi\rho) - \frac{n \omega^2}{c^2 \mu \rho} b_n(\varpi) H_n^{(2)}(\chi\rho) \right) e^{-i\varpi z} e^{i\omega t} dh d\omega; \quad (5)$$

$$H_\phi(\rho, \phi, z, t) =$$

$$= \frac{1}{c} \sum_{n=-N_g}^{N_g} e^{in\phi} \int_{\omega_q \leq |\omega| \leq \omega_{\max}} \int_{-1}^1 \left(\frac{n \omega^2}{c \rho} a_n(\varpi) h H_n^{(2)}(\chi\rho) + i \frac{\omega^2}{c^2 \mu} b_n(\varpi) \frac{\partial}{\partial \rho} H_n^{(2)}(\chi\rho) \right) e^{-i\varpi z} e^{i\omega t} dh d\omega, \quad (6)$$

где t — время; c — скорость света; μ — магнитная проницаемость среды; ω — угловая частота; ω_q — наименьшая частота волнового диапазона; ω_{\max} — наибольшая частота суммируемых временных гармоник; $N_g = \omega_{\max} \rho_a / c$ — наиболь-

шее число угловых гармоник; ρ_a — минимальный радиус цилиндра, охватывающего ИУ; h — проекция нормали фазового фронта однородной цилиндрической волны на ось OZ (в сферических координатах $h = \cos \theta$); $H_n^{(2)}(\chi\rho)$ — функция Ханкеля II-го рода; $\chi = \frac{\omega}{c} \sqrt{1-h^2}$; $a_n(\varpi)$ и $b_n(\varpi)$ — подлежащие определению амплитудные спектры однородных цилиндрических волн электрического поля ИУ; $\varpi = \omega h / c$.

Амплитудные спектры $a_n(\varpi)$ и $b_n(\varpi)$ определяются по результатам пространственно-временного распределения касательных составляющих напряженности электрического поля на цилиндрической поверхности измерения:

$$a_n(\varpi) = \frac{1}{8\pi^3 i \mu \omega \frac{\partial}{\partial \rho} H_n^{(2)}(\chi\rho) \Big|_{\rho=\rho_0}} \times \\ \times \left(\gamma_n^\varphi(\omega, h, \rho_0) - \frac{\gamma_n^z(\omega, h, \rho_0) hn}{c \chi^2 \rho_0} \right);$$

$$b_n(\varpi) = \frac{1}{8\pi^3 \chi^2 H_n^{(2)}(\chi\rho_0)} \gamma_n^z(\omega, h, \rho_0). \quad (7)$$

Здесь $\gamma_n^\varphi(\omega, h, \rho_0) =$

$$= \int_{-T/2}^{T/2} \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \int_{-\pi}^{\pi} E_\varphi(\rho_0, \phi, z, t) e^{-in\phi+i\varpi z} e^{-i\omega t} d\phi dz dt;$$

$$\gamma_n^z(\omega, h, \rho_0) =$$

$$= \int_{-T/2}^{T/2} \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \int_{-\pi}^{\pi} E_z(\rho_0, \phi, z, t) e^{-in\phi+i\varpi z} e^{i\omega t} d\phi dz dt;$$

T — временной интервал измерений (период); z_{\min} и z_{\max} — соответственно минимальное и максимальное значения координаты z цилиндрических поверхностей измерения; $E_\varphi(\rho_0, \phi, z, t)$ и $E_z(\rho_0, \phi, z, t)$ — измеряемые на цилиндрической поверхности радиуса ρ_0 составляющие вектора \vec{E} .

В дальней зоне принцип стационарной фазы [6] позволяет определить составляющие напряженности электрического поля ИУ в сфериче-

ской системе координат r, ϑ, ϕ следующим образом:

$$E_\vartheta(r, \vartheta, \phi, t) = -\frac{2\sin\vartheta}{c^2 r} \sum_{n=-N_g}^{N_g} i^{n+1} e^{in\phi} \int_{\omega_q \leq |\omega| \leq \omega_{\max}} b_n \left(\frac{\omega}{c} \cos \vartheta \right) \times \omega^2 e^{-i\frac{\omega}{c} r} e^{i\omega t} d\omega;$$

$$E_\phi(r, \vartheta, \phi, t) = \frac{2i\mu\varepsilon}{c r} \sum_{n=-N_g}^{N_g} i^n e^{in\phi} \int_{\omega_q \leq |\omega| \leq \omega_{\max}} a_n \left(\frac{\omega}{c} \cos \vartheta \right) \omega e^{-i\frac{\omega}{c} r} e^{i\omega t} d\omega. \quad (8)$$

Составляющие H_ϑ и H_ϕ в дальней зоне определяются равенствами

$$H_\phi(r, \vartheta, \phi, t) = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_\vartheta(r, \vartheta, \phi, t),$$

$$H_\vartheta(r, \vartheta, \phi, t) = -\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_\phi(r, \vartheta, \phi, t). \quad (9)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость среды.

В области измерения электрическое поле, обусловленное как ИУ, так и вторичными источниками, можно записать в пространственно-временной интерпретации следующим образом:

$$E_{z\Sigma}(z, \varphi, \rho, t) = \frac{1}{c} \sum_{n=-N_g}^{N_g} e^{in\varphi} \int_{\omega_q \leq |\omega| \leq \omega_{\max}} \int_{-1}^1 \frac{\omega^3}{c^2} (1-h^2) \times \left(b_n(\omega) + H_n^{(2)}(\chi\rho) + B_n(\omega) J_n(\chi\rho) \right) \times e^{-i\omega z} e^{i\omega t} dh d\omega; \quad (10)$$

$$E_{\rho\Sigma}(z, \varphi, \rho, t) = \frac{1}{c} \sum_{n=-N_g}^{N_g} e^{in\varphi} \int_{\omega_q \leq |\omega| \leq \omega_{\max}} \int_{-1}^1 \frac{\mu n \omega^3}{\rho} \times \left(a_n(\omega) H_n^{(2)}(\chi\rho) + A_n(\omega) J_n(\chi\rho) \right) + i \frac{\omega^2}{c} h \left(b_n(\omega) \frac{\partial}{\partial \rho} H_n^{(2)}(\chi\rho) + B_n(\omega) \frac{\partial}{\partial \rho} J_n(\chi\rho) \right) \times e^{-i\omega z} e^{i\omega t} dh d\omega; \quad (11)$$

$$E_{\varphi\Sigma}(z, \varphi, \rho, t) = -\frac{1}{c} \sum_{n=-N_g}^{N_g} e^{in\varphi} \int_{\omega_q \leq |\omega| \leq \omega_{\max}} \int_{-1}^1 i \mu \omega^2 \left(a_n(\omega) \frac{\partial}{\partial \rho} H_n^{(2)}(\chi\rho) + A_n(\omega) \frac{\partial}{\partial \rho} J_n(\chi\rho) \right) - \frac{n \omega^2}{c \rho} h \left(b_n(\omega) H_n^{(2)}(\chi\rho) + B_n(\omega) J_n(\chi\rho) \right) \times e^{-i\omega z} e^{i\omega t} dh d\omega. \quad (12)$$

Здесь $E_{z\Sigma}$, $E_{\rho\Sigma}$, $E_{\varphi\Sigma}$ — составляющие вектора напряженности суммарного электрического поля в цилиндрической системе координат; $J_n(\chi\rho)$ — функция Бесселя I-го рода; $a_n(\omega)$ и $b_n(\omega)$ — подлежащие определению амплитудные спектры однородных цилиндрических волн ЭМП ИУ; $A_n(\omega)$ и $B_n(\omega)$ — амплитудные спектры однородных цилиндрических волн вторичного поля (отраженное от стен и аппаратуры поле).

Таким образом, задача заключается в определении $a_n(\omega)$ и $b_n(\omega)$ по измерениям касательных составляющих напряженности электрического поля на цилиндрических поверхностях, охватывающих ИУ, с последующим восстановлением поля в представляющей интерес пространственно-временной области. Если выполнить измерения касательных составляющих вектора \vec{E}_Σ на двух коаксиальных цилиндрических поверхностях ρ_1 и ρ_2 ($\rho_2 > \rho_1$), то $a_n(\omega)$ и $b_n(\omega)$ можно определить следующим образом:

$$a_n(\omega) = \frac{1}{\Delta'} \left(\gamma_n(\omega, h, \rho_1) \frac{\partial}{\partial \rho} J_n(\chi\rho) \Big|_{\rho=\rho_1} - \gamma_n(\omega, h, \rho_2) \frac{\partial}{\partial \rho} J_n(\chi\rho) \Big|_{\rho=\rho_2} \right);$$

$$b_n(\omega) = \frac{1}{\Delta} (\beta_n(\omega, h, \rho_1) J_n(\chi\rho_2) - \beta_n(\omega, h, \rho_2) J_n(\chi\rho_1)), \quad (13)$$

где

$$\Delta' = \frac{\partial H_n^{(2)}(\chi\rho)}{\partial \rho \Big|_{\rho=\rho_1}} \frac{\partial J_n(\chi\rho)}{\partial \rho \Big|_{\rho=\rho_2}} -$$



$$-\frac{\partial H_n^{(2)}(\chi\rho)}{\partial \rho} \frac{\partial J_n(\chi\rho)}{\partial \rho}_{|\rho=\rho_2};$$

$$\Delta = H_n^{(2)}(\chi\rho_1)J_n(\chi\rho_2) - H_n^{(2)}(\chi\rho_2)J_n(\chi\rho_1).$$

В обобщенном виде $\gamma_n(\omega, h, \rho_{1(2)})$ и $\beta_n(\omega, h, \rho_{1(2)})$ представляются следующими равенствами:

$$\begin{aligned} \gamma_n(\omega, h, \rho_{1(2)}) &= \\ &= \frac{i}{8\pi^3 \mu \omega} (\gamma_n^\phi(\omega, h, \rho_{1(2)}) - \frac{nh}{c\chi^2 \rho_{1(2)}} \gamma_n^z(\omega, h, \rho_{1(2)})); \\ \beta_n(\omega, h, \rho_{1(2)}) &= \frac{1}{8\pi^3 \chi^2} \gamma_n^z(\omega, h, \rho_{1(2)}). \end{aligned} \quad (14)$$

Входящие в (14) $\gamma_n^\phi(\omega, h, \rho_{1(2)})$ и $\gamma_n^z(\omega, h, \rho_{1(2)})$ определяются выражениями

$$\begin{aligned} \gamma_n^\phi(\omega, h, \rho_{1(2)}) &= \\ &= \int_{-T/2}^{T/2} \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \int_{-\pi}^{\pi} E_\phi^\Sigma(\rho_{1(2)}, \phi, z, t) \times \\ &\quad \times e^{-in\phi+i\varpi z} e^{-i\omega t} d\phi dz dt; \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \gamma_n^z(\omega, h, \rho_{1(2)}) &= \\ &= \int_{-T/2}^{T/2} \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \int_{-\pi}^{\pi} E_z^\Sigma(\rho_{1(2)}, \phi, z, t) \times \\ &\quad \times e^{-in\phi+i\varpi z} e^{i\omega t} d\phi dz dt, \end{aligned} \quad (16)$$

где $E_\phi^\Sigma(\rho_{1(2)}, \phi, z, t)$ и $E_z^\Sigma(\rho_{1(2)}, \phi, z, t)$ — измеряемые на цилиндрических поверхностях радиусов ρ_1 и ρ_2 составляющие \vec{E}_Σ .

Для выполнения условий $\Delta \neq 0$ и $\Delta' \neq 0$ следует обеспечить выполнение равенства

$$\rho_2 - \rho_1 \approx \frac{\pi}{2} \frac{c}{\omega_{\max}}. \quad (17)$$

После нахождения $a_n(\omega)$ и $b_n(\omega)$ определяются составляющие векторов \vec{E} и \vec{H} по выражениям (1)–(6) в ближней зоне и по (8), (9) в дальней зоне.

Возможность определения первичного электромагнитного поля волнового источника на фоне вторичного можно показать с помощью

простого вычислительного эксперимента. В качестве модели первичного источника рассмотрим синфазную плоскую решетку из 49 (7×7) электрических диполей, а вторичного источника — идеально проводящую плоскость, отстоящую от плоскости решетки на 12λ . Не нарушая общности, для такой несложной модели легко находится распределение касательных составляющих суммарного поля на двух цилиндрических поверхностях, расположены между первичным и вторичным источниками. Массивы составляющих E_z и E_ϕ , рассчитанные на двух окружающих решетку цилиндрических поверхностях с радиусами 3λ и $3,25\lambda$. При этом размерности измеряемых массивов — $N_z = 81$, $N_\phi = 63$. Высота цилиндрических поверхностей измерения составляла 20λ . Расстояние между диполями составляло $\lambda/2$, $\lambda = 0,1$ м. Результат восстановления поля первичного источника на фоне вторичного приведен ниже на рисунке. Следует заметить, что практическая реализация этого метода требует перемещения зонда без изменения положения ИУ.

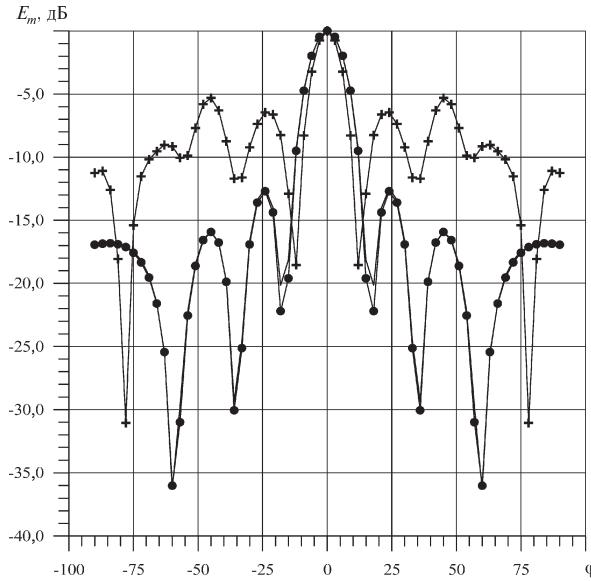
В области частот $0 \leq |\omega| \leq \omega_q$ поле ИУ — квазистационарное. Квазистационарными источниками поля могут быть входящие в состав радиотехнических систем электроприводы и их устройства управления, антенные переключатели каналов и т. д. Математическая модель статических и квазистационарных магнитных полей (при $0 \leq |\omega| \leq \omega_q$) уединенных источников в цилиндрических координатах может быть образована суммированием элементарных векторных цилиндрических гармоник [7], что в векторной форме можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \vec{H}(\rho, \phi, z, t) &= \\ &= \int_{0 \leq |\omega| \leq \omega_q} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} a_n^M(\hbar, \omega) \vec{H}_{n\hbar} e^{i\omega t} d\hbar d\omega, \end{aligned} \quad (18)$$

где в цилиндрических координатах

$$\vec{H}_{n\hbar} = H_{\rho n\hbar} \vec{e}_\rho + H_{\phi n\hbar} \vec{e}_\phi + H_{z n\hbar} \vec{e}_z \quad (19)$$

есть элементарная векторная цилиндрическая гармоника магнитного поля уединенного источника; $H_{\rho n\hbar}$, $H_{\phi n\hbar}$, $H_{z n\hbar}$ — проекции векторной цилиндрической гармоники на оси цилиндрической системы координат; \vec{e}_ρ , \vec{e}_ϕ , \vec{e}_z — единичные векторы (орты) цилиндрической системы коор-



Амплитудное распределение поля первичного источника:

—+— — восстановленное без учета влияния вторичного поля; —●— с учетом вторичного поля, восстановленное на основе выражений (10)–(17)

динат; $a_n^M(\hbar, \omega)$ — весовой коэффициент векторных цилиндрических гармоник магнитного поля, значение которого необходимо определить по результатам экспериментального исследования соответствующих составляющих вектора напряженности магнитного поля уединенного источника на базовой цилиндрической поверхности.

Выражения для составляющих вектора \vec{H} уединенного источника получаются как результат суммирования по всем целым n и интегрирования по всем \hbar . Они представляют собой следующие соотношения для обобщенной математической модели магнитного поля:

$$H_\rho(\rho, \phi, z, t) = - \int_{0 \leq |\omega| \leq \omega_q} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} a_n^M(\hbar, \omega) \frac{\partial R_{n\hbar}^{(1)}(\rho)}{\partial \rho} \times e^{i\hbar z + in\phi} e^{i\omega t} d\hbar d\omega;$$

$$H_\phi(\rho, \phi, z, t) = - \int_{0 \leq |\omega| \leq \omega_q} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} a_n^M(\hbar, \omega) \frac{1}{\rho} R_{n\hbar}^{(1)}(\rho) i n e^{i\hbar z + in\phi} \times e^{i\omega t} d\hbar d\omega;$$

$$H_z(\rho, \phi, z, t) =$$

$$= - \int_{0 \leq |\omega| \leq \omega_q} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} a_n^M(\hbar, \omega) R_{n\hbar}^{(1)}(\rho) i \hbar e^{i\hbar z + in\phi} \times e^{i\omega t} d\hbar d\omega, \quad (20)$$

$$\text{где } R_{n\hbar}^{(1)}(\rho) = \begin{cases} (\operatorname{sgn} \hbar)^n K_n(\hbar \rho) & \text{при } \hbar \neq 0; \\ \rho^{-n} & \text{при } \hbar = 0, \end{cases} \quad (21)$$

$K_n(\hbar \rho)$ — функция Кельвина.

Обобщенная математическая модель составляющих вектора напряженности электрического поля уединенного источника аналогична (20), только в левой части выражений (20) следует записать E_ρ , E_ϕ , E_z соответственно в первом, втором и третьем соотношениях, а в правой части — заменить $a_n^M(\hbar, \omega)$ на $a_n^E(\hbar, \omega)$. На практике пределы интегрирования по \hbar и суммирования по n ограничиваются на основе теоремы Котельникова в зависимости от характера изменения измеряемой составляющей H_ρ .

Обобщенная математическая модель низкочастотных полей уединенных источников, когда в области расположения цилиндрической поверхности радиуса ρ_0 нет влияния помехонесущих полей от источников во внешней области пространства, образуется выражениями (20).

Для определения весовых коэффициентов $a_n^M(\hbar, \omega)$ целесообразно использовать распределение составляющей H_ρ на цилиндрической поверхности радиуса $\rho = \rho_0$, охватывающей исследуемый источник. Это объясняется равенством нулю составляющих H_ϕ и H_z при $n=0$ и $\hbar=0$. Получив экспериментальным путем распределение $H_\rho(\rho_0, \phi, z, t)$ и используя обратное двумерное преобразование Фурье, $a_n^M(\hbar, \omega)$ можно определить следующим образом:

$$a_n^M(\hbar, \omega) = - \left(8\pi^3 \frac{\partial R_{n\hbar}^{(1)}(\rho)}{\partial \rho} \Big|_{\rho=\rho_0} \right)^{-1} \times \times \int_{-T/2}^{T/2} \int_{-Z/2}^{Z/2} \int_{-\pi}^{\pi} H_\rho(\rho_0, \phi, z, t) e^{-i\hbar\phi - in\phi} e^{-i\omega t} d\phi dz. \quad (22)$$

где z — высота цилиндрической поверхности измерения.



После определения значений $a_n^M(\hbar, \omega)$ по выражениям (22) можно найти составляющие магнитного поля в области пространства $\rho > \rho_0$.

Таким образом, приведенные соотношения позволяют определить в волновом и квазистационарном случаях пространственно-временную структуру электромагнитных полей ИУ по результатам измерений на охватывающих цилин-

дрических поверхностях. Наиболее простая практическая реализация цилиндрического сканера возможна при выполнении допущений об единственности источника. Такие условия возможны в экранированной безэховой камере, оборудованной сверширокополосным радиопоглощающим материалом. Однако необходимо учитывать, что с уменьшением частоты возрастает уровень вторичного поля, и следует использовать методы и средства, позволяющие выделить поле ИУ на фоне вторичного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уильямс, Т. ЭМС для разработчиков продукции [Текст] / Т. Уилльямс // Пер. с англ. под ред. Л.Н. Кечиева.— М.: Издательский дом «Технологии», 2003.— 540 с.
2. Korovkin, N.V. Inverse problems in electric circuits and electromagnetics [Текст] / N.V. Korovkin, V.L. Chechurin, M. Hayakawa.— USA, Springer.— 2006, 331 p.,
3. Курочкин, А.П. Теория и техника антенных измерений [Текст] / А.П. Курочкин // Антенны.— 2009. № 7.— С. 39–44.
4. Демирчян, К.С. Теоретические основы электротехники: Т. 2 [Текст] / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин.— СПб.: Питер, 2009.— 430 с.
5. Кирпанев, А.В. Исследование широкополос-
- ных антенн по измерениям на цилиндрической поверхности в ближней зоне [Текст] / А.В. Кирпанев // Сб. докл. VIII Всероссийск. конф. по электромагнитной совместимости и электробезопасности.— СПб. / СПбГЭТУ.— 2004.— С. 351–355.
6. Leach, W.M. Probe-compensated near-field measurements on a cylinder [Текст] / W.M. Leach, D.T. Paris // IEEE. Trans. Ant. and Propag.— 1973. Vol. AP.21.— №4.— Р. 435–445.
7. Кирпанев, А.В. Идентификация низкочастотных электромагнитных полей исследуемых на ЭМС радиотехнических систем [Текст] / А.В. Кирпанев // Сб. докл. VI российской науч.-техн. конференции «ЭМС технических средств и биологических объектов» / ВИТУ.— СПб., 2000.— С. 278–282.

УДК 621.165

А.А. Епифанов, А.И. Кириллов, В.А. Рассохин

РАСЧЕТ ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ В СТУПЕНИЯХ МАЛОРАСХОДНЫХ ТУРБИН

Положительный опыт применения программного комплекса ANSYS CFX для расчета характеристик сопловых и рабочих решеток малорасходных турбин конструкции ЛПИ [1] позволил перейти к постановке задачи численного моделирования трехмерного течения вязкого газа в ступенях, составленных из таких решеток. Задача облегчалась тем, что характеристики решеток в широком диапазоне изменения числа Маха (0,7–1,8) удалось прогнозировать с приемлемой для инженерных целей точностью [4], используя экономный в отношении затрат вычислитель-

ных ресурсов RANS-подход с замыкающей высокорейнольдсовой версией модели турбулентности SST–CC [2].

Цели и задачи исследования. Основная проблема расчета трехмерного течения в ступени — учет взаимного влияния течений в неподвижной решетке лопаток направляющего аппарата и во вращающейся решетке лопаток рабочего колеса. С целью моделирования эффекта взаимного влияния решеток в современных программных комплексах в зазоре между лопаточными венцами размещают искусственную поверхность со-

пряжения параметров потока при переходе от абсолютного движения к относительному.

Наиболее точное решение задачи достигается расчетом нестационарного течения как в области направляющей решетки, так и в области решетки рабочего колеса. Однако следует иметь в виду, что время, необходимое для расчета одного режима нестационарного течения в ступени в полной постановке, даже на персональном компьютере весьма высокого класса (процессор *i5*, тактовая частота 2,7 ГГц, оперативная память 16 Гб) измеряется неделями. Поэтому, решая задачу расчета обтекания ступени в приемлемое для инженера время и с необходимой точностью, целесообразно рассмотреть возможность применения упрощенных опций, требующих значительно меньших вычислительных ресурсов.

Отмеченное выше определило задачи нашей работы:

исследовать влияние реализованных в ANSYS CFX способов сопряжения течения в решетках соплового аппарата и рабочего колеса на характеристики типовой малорасходной турбинной ступени конструкции ЛПИ;

верифицировать результаты расчетов в широком диапазоне режимов работы ступени.

Влияние способа сопряжения. Объект исследования — малорасходная ступень (рис. 1), состоящая из 24-х сопловых и 75-ти рабочих лопаток со следующими геометрическими характеристиками: угол выхода сопловой решетки — 5°; безразмерный шаг сопловой решетки* — 3,8; угол входа рабочей решетки — 13°; угол выхода рабочей решетки — 13°; безразмерный шаг рабочей решетки — 1,7.

Программный комплекс ANSYS CFX позволяет сопрягать течение в решетках соплового аппарата и рабочего колеса тремя способами. Два из них, способы Stage и Frozen Rotor, предусматривают расчет стационарного течения, а третий способ, Transient Rotor Stator, — нестационарного течения в ступени.

При расчете кольцевой решетки рабочего колеса способом Stage на поверхности сопряжения выполняется осреднение в окружном направлении параметров потока, определяющих входные граничные условия. В этих условиях решетка рабочих лопаток обтекается в относитель-

ном движении искусственно сформированным осесимметричным стационарным потоком. Такая схема расчета позволяет независимо от соотношения чисел сопловых и рабочих лопаток ограничиться расчетом одного канала как в сопловой, так и в рабочей решетке, поскольку и в том, и в другом случаях ставятся периодические граничные условия. Расчет одного режима работы ступени способом Stage на указанном выше компьютере с использованием RANS-подхода и высокорейнольдсовой модели турбулентности занимает около двух часов.

Способ Frozen Rotor, как и способ Stage, предусматривает расчет стационарного течения в абсолютном для решетки соплового аппарата и в относительном для решетки рабочего колеса движении, но при фиксированном положении одних лопаток относительно других. Через поверхность сопряжения поток проходит без осреднения в окружном направлении. При таком подходе возникает проблема выделения расчетной области.

С уменьшением общего кратного K чисел сопловых и рабочих лопаток расчетная область становится чрезмерно большой. При $K = 1$ (что часто встречается в реальных конструкциях) она охватывает все межлопаточные каналы ступени. С целью снижения времени расчета до разумных пределов профили скорости (и распределения других консервативных величин) приходится масштабировать в окружном направлении. Конечно, масштабирование вносит в расчет погрешность. Однако выполненные нами оценки показали, что при разнице длин расчетных областей сопловой и рабочей решеток в окружном направлении менее 5 % дополнительная погрешность от масштабирования не превышает погрешности вычисления интегральных характеристик ступени*. Для рассматриваемой ступени в качестве расчетной области достаточно выбрать один сопловой и три рабочих канала (см. рис. 1). При этом профиль скорости рабочей решетки масштабируется в отношении 1:0,96, что вполне приемлемо.

Для того чтобы, пользуясь способом Frozen Rotor, получить осредненное влияние на обтекание решеток неоднородности поля скорости

* Здесь и далее безразмерным шагом решетки названо отношение шага к осевой ширине решетки.

* Вопрос о влиянии масштабирования решеток на точность расчета их аэроупругих характеристик требует специального изучения.

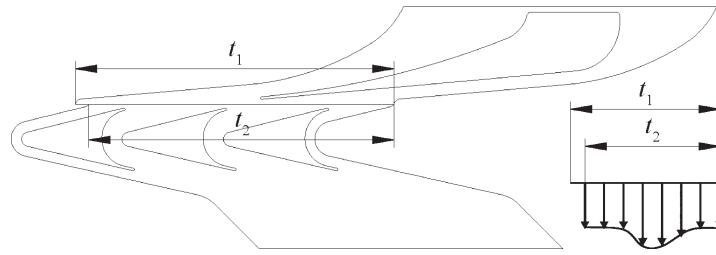


Рис. 1. Среднее сечение малорасходной ступени (слева) и масштабирование профилей скорости на поверхности сопряжения при расчете способами Frozen Rotor и Transient Rotor Stator (справа)

в межвенцевом зазоре ступени, необходимо выполнить несколько расчетов при различных взаимных положениях сопловых и рабочих лопаток. Опыт расчетов показал, что удовлетворительный по точности результат достигается уже после трех расчетов. При этом входную кромку рабочей лопатки в плоскости сопряжения следует размещать на расстоянии около 1/6 шага рабочей решетки справа и слева относительно аэродинамического следа, сходящегося с сопловой лопаткой, а также устанавливать в положение, соответствующее направлению указанного аэродинамического следа, примерно в середину межлопаточного канала рабочей решетки. Продолжительность расчета одного режима работы ступени способом Frozen Rotor втрое больше, чем способом Stage, и составляет около 6 часов.

Нестационарный расчет способом Transient Rotor Stator требует наибольших временных затрат. Этим способом течение рассчитывалось с шагом по времени около $5 \cdot 10^{-6}$ с, что соответ-

ствует 40 взаимным положениям сопловой и рабочей решеток за цикл смешения рабочей лопатки на величину шага направляющей решетки. Время непрерывного расчета одного режима работы ступени в этом случае достигает 14 суток. По окончании расчета вычисляются осредненные за цикл характеристики ступени.

Рассмотрим структуру потерь в ступени наnominalном режиме ($M_{c1} = 1,45$), полученную каждым из трех способов сопряжения решеток соплового аппарата и рабочего колеса (рис. 2). Расчет способом Stage прогнозирует всплески потерь на поверхности сопряжения со стороны сопловой решетки (см. рис. 2, а, область А). При $M_{c1} < 1,3$ всплески исчезают, при больших числах Маха — усиливаются. Расчеты способами Frozen Rotor и Transient Rotor Stator (рис. 2, б и в) аналогичных всплесков потерь не выявили. Поэтому есть основание полагать, что всплески потерь в области А — результат присущего способу Stage искусственного осреднения парамет-

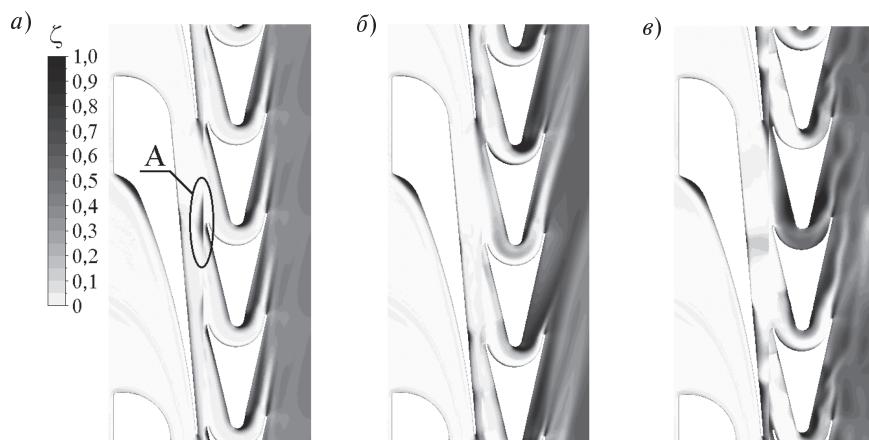


Рис. 2. Поля локальных коэффициентов потерь в венцах ступени, полученные в расчетах способами сопряжения Stage (а), Frozen Rotor (б) и Transient Rotor Stator (в)

ров потока на поверхности сопряжения, и их следует признать артефактными.

При сопряжении решеток соплового аппарата и рабочего колеса способом Frozen Rotor рабочие лопатки обтекаются неоднородным потоком, вследствие чего заметно возрастают потери в рабочей решетке и несколько увеличиваются потери в области выходных кромок сопловых лопаток из-за обратного влияния рабочей решетки. Учет эффекта нестационарности (расчет способом Transient Rotor Stator) также приводит к перераспределению потерь в расчетной области (рис. 2, б и в).

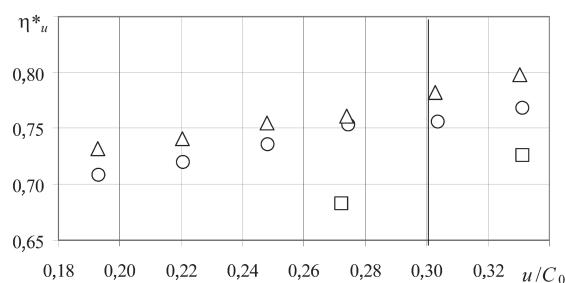


Рис. 3. Зависимость расчетного КПД ступени, вычисленного по параметрам торможения, от режима работы ступени:
расчет способами Stage (O);Frozen Rotor (Δ);
Transient Rotor Stator (□)

Рассмотрим интегральные характеристики ступени. Кривая, соответствующая КПД ступени (рис. 3) и рассчитанная способом сопряжения Stage, лежит ниже кривой, полученной с помощью Frozen Rotor, в среднем на 1,5–2,0 %. Этот противоречащий физике течения результат связан с завышением при расчете способом Stage потерь в сопловой решетке (рис. 4) вследствие их артефактных всплесков вблизи поверхности сопряжения.

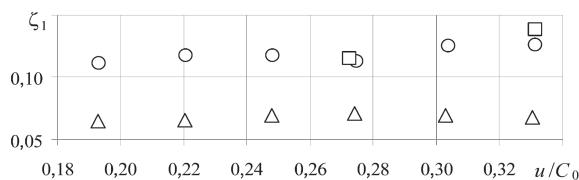


Рис. 4. Зависимость коэффициента потерь в решетке соплового аппарата от режима работы ступени:
расчет способами Stage (O); Frozen Rotor (Δ);
Transient Rotor Stator (□)

Расчет способом Transient Rotor Stator показывает заметное увеличение потерь в сопловом аппарате (см. рис. 4) и в решетке рабочего колеса (рис. 5), а также снижение КПД ступени под влиянием нестационарности. На номинальном режиме ($u/C_0 \approx 0,27$), например, КПД снизился примерно на 7,5 % по сравнению с данными расчета способом Frozen Rotor (см. рис. 3).

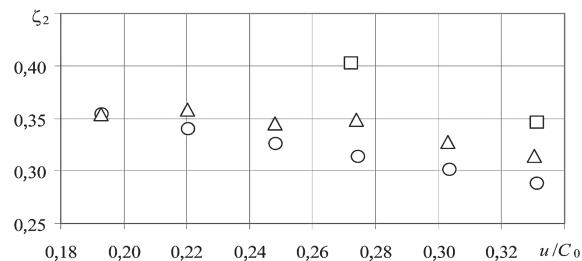


Рис. 5. Зависимость коэффициента потерь в решетке рабочего колеса от режима работы ступени:
расчет способами Stage (O);Frozen Rotor (Δ);
Transient Rotor Stator (□)

Приведенные выше данные, а также опыт расчета суммарных характеристик других малорасходных ступеней в широком диапазоне режимов на основе численного моделирования трехмерного течения свидетельствуют о возможности эффективного применения для этой цели программного комплекса ANSYS CFX. Достигаемая точность расчетного определения потерь в ступени оказывается в обратной зависимости от затраченного на расчет времени.

При этом необходимо иметь в виду, что наиболее экономичный с точки зрения затрат вычислительного времени способ Stage нельзя рекомендовать для ступеней со сверхзвуковыми сопловыми аппаратами ($M_{c1} > 1,3$) при малых углах выхода потока из сопел ($\alpha_1 < 5^\circ$) из-за артефактных явлений на поверхности сопряжения. В таких случаях для расчета стационарного течения следует использовать способ Frozen Rotor. Поправку на дополнительные потери от нестационарности можно оценить, выполнив один-два расчета способом Transient Rotor Stator для характерных значений режимного параметра.

Верификация расчетных характеристик ступени. Объект исследования — малорасходная ступень конструкции ЛПИ, которая испытывалась на модернизированном и оснащенном системой сбора и обработки экспериментальных

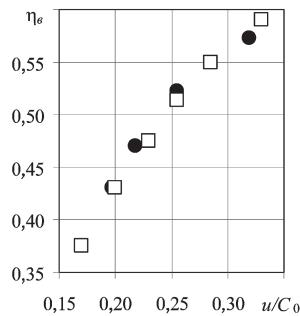


Рис. 6. Зависимость внутреннего КПД ступени от режима работы при полном давлении перед ступенью $p_0^* = 0,2$ МПа:
эксперимент (●); расчет (□)

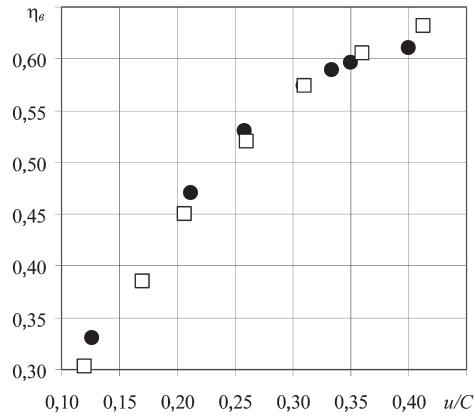


Рис. 7. Зависимость внутреннего КПД ступени от режима работы при полном давлении перед ступенью $p_0^* = 0,3$ МПа:
эксперимент (●); расчет (□)

данных стенде ЭТ-3М [3] кафедры ТДУ СПбГПУ. Ступень состояла из 24 тангенциаль но расположенных сопловых и 75 рабочих лопаток. Основные геометрические характеристики лопаточного аппарата: геометрический угол выхода сопловой решетки — 5°; безразмерный шаг сопловой решетки — 3,8; геометрический угол входа рабочей решетки — 7,3°; геометрический угол выхода рабочей решетки — 7,3°; безразмерный шаг рабочей решетки — 1,7.

С целью снижения протечек и повышения эффективности работы ступени в ее конструкции предусмотрено развитое прикорневое осерадиальное

уплотнение. Между периферией рабочих лопаток и стенкой корпуса предусмотрен радиальный зазор 0,5 мм. Для снижения осевого усилия на подшипники диска рабочего колеса изготовлен с отверстиями. При постановке расчета эти конструктивные особенности ступени моделировались.

Ступень верифицировалась по данным испытаний в широком диапазоне изменения числа оборотов рабочего колеса ($n = 2000\text{--}8000$ об/мин) и давления торможения перед соплами ($p_0^* = 0,2\text{--}0,42$ МПа) при неизменной температуре торможения на входе ($T_0^* = 323$ К) и неизменном противодавлении ($p_2 = 0,103$ МПа).

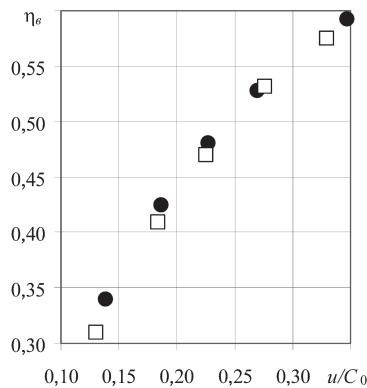


Рис. 8. Зависимость внутреннего КПД ступени от режима работы при полном давлении перед ступенью $p_0^* = 0,42$ МПа:
эксперимент (●); расчет (□)

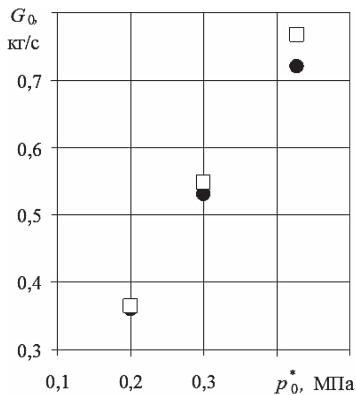


Рис. 9. Зависимость массового расхода от полного давления перед ступенью:
эксперимент (●); расчет (□)

Из экспериментальных данных было известно, что уровень чисел Маха за сопловым аппаратом на всех режимах не превышал 1,28. Исходя из этого решетки соплового аппарата и рабочего колеса можно было сопрягать способом Stage, не опасаясь артефактных явлений в плоскости сопряжения. К рассчитанным в стационарной постановке величинам коэффициентов потерь в решетках соплового аппарата и рабочего колеса добавлялась поправка на величину потерь от нестационарности.

Рис. 6–9 позволяют сопоставить экспериментальные и расчетные значения внутреннего КПД

ступени, а также массового расхода на различных режимах. Расчетные и экспериментальные значения внутреннего КПД ступени и расхода вполне удовлетворительно согласуются в широком диапазоне изменения режимных параметров.

Результаты выполненных пробных и верификационных расчетов с использованием программного комплекса ANSYS CFX обосновывают возможность корректного расчета суммарных характеристик малорасходных турбинных ступеней конструкции ЛПИ на основе моделирования трехмерного течения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рассохин, В.А. Турбины конструкции ЛПИ: Преимущества, характеристики, опыт разработки и применение [Текст] / В.А. Рассохин // Энергомашиностроение. Труды СПбГПУ.— № 491.— СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2004.— С. 152–161.
2. Smirnov, P.E. Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart-Shur correction term [Текст] / P.E. Smirnov, F.R. Menter // ASME Paper (GT2008-50480).— 2008.— Р. 1–8.
3. Афанасьева, Н.Н. Аэродинамические характеристики ступеней тепловых турбин [Текст] / Н.Н. Афанасьева, В.Н. Бусурин, И.Г. Гоголев [и др.] / Под общ. ред. В. А. Черникова.— Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1980.— 263 с.
4. Епифанов, А.А. Газодинамический расчет характеристик лопаточных решеток малорасходных турбин [Текст] / А.А. Епифанов, А.И. Кириллов, В.А. Рассохин // Научно-технические ведомости СПбГПУ— Сер.: Наука и образование. 2012. № 1(142).— С. 50–55.

УДК 621.313.3

С.Ю. Логинов

СНИЖЕНИЕ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ РАДИАЛЬНЫХ СИЛ В БЕСПОДШИПНИКОВОЙ ИНДУКТОРНОЙ МАШИНЕ

Современное развитие электропривода идет в направлениях наращивания скоростей и мощностей, а также расширения областей его применения (работа в вакууме, при высоких и низких температурах, агрессивных средах, сверхчистых технологиях). В связи с этим возникают определенные проблемы, связанные с подшипниками опорами. Кардинальное решение проблем состоит в избавлении от механических опор как таковых. Существуют несколько вариантов выполнения бесподшипниковых опор: газостатические, газодинамические, гидростатические, гидродинамические и активные магнитные под-

шипники. Каждый из вариантов имеет как преимущества, так и недостатки.

В некоторых приложениях электроприводов (работа в вакууме, сверхчистые технологии) можно применять только активный магнитный подвес (АМП) [1]. Недостаток АМП связан с необходимостью значительного увеличения длины вала, что в свою очередь приводит к уменьшению критических скоростей и номинальных частот вращения. Следующий этап в развитии АМП — бесподшипниковая электрическая машина (БЭМ). В зазоре создается электромагнитное поле, которое в свою очередь создает как вра-



щающий момент, так и управляемые радиальные силы. Уменьшенная за счет этого длина вала приводит к росту критических скоростей, уменьшению частот вращения, уменьшению массово-габаритных показателей и удешевлению системы электропривода.

Различные варианты исполнения БЭМ на основе электродвигателей различных типов (асинхронные двигатели, двигатели с постоянными магнитами, индукторные и др.) находят все большее применение в различных областях производства [2]. В Псковской инженерной компании совместно с ОАО «Электропривод» была разработана бесподшипниковая индукторная машина (БПИМ) оригинальной конструкции.

К преимуществам индукторного двигателя можно отнести простоту в изготовлении (чего нельзя сказать о двигателях с постоянными магнитами), температурную независимость, в отличие от двигателей с постоянными магнитами (где магнитная проводимость зависит от температуры), а также от асинхронных (у которых меняется электрическая проводимость обмоток ротора). Однако индукторные двигатели обычно обладают меньшим значением КПД по сравнению с двигателями на постоянных магнитах.

Статор имеет 16-полюсную структуру, а ротор — восьмиполюсную. Принцип создания магнитного потока в этой машине показан на рис. 1.

При сложении потоков, создаваемых обмотками привода и обмотками подвеса, происходит увеличение индукции под одними зубцами статора и уменьшение под другими, что приводит к созданию врачающего момента. Управление радиальными силами происходит путем изменения амплитуды тока в обмотках подвеса. Силы, действующие на ротор, определяются как частные производные магнитной энергии по обобщенным координатам. Рассмотрим один модуль бесподшипниковой машины. В качестве обобщенных координат примем координаты центра магнитоактивной части в осях x и y , а также угол вращения ротора Φ .

Статор имеет пять однофазных обмоток: обмотку привода m и обмотки подвеса $x1, x2, y1, y2$. Таким образом, магнитная энергия системы определяется выражением

$$W = \frac{1}{2} L_m i_m^2 + \frac{1}{2} L_{x1} i_{x1}^2 + \frac{1}{2} L_{x2} i_{x2}^2 +$$

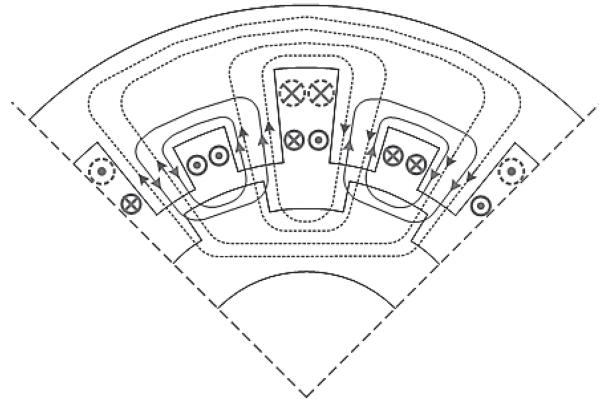


Рис. 1. Создание магнитного потока в БПИМ

- ⊗⊗ — обмотки подвеса;
- ⊗⊗ — обмотки привода;
- — поле обмотки подвеса;
- — поле обмотки привода

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{2} L_{y1} i_{y1}^2 + \frac{1}{2} L_{y2} i_{y2}^2 + \\
 & + M_{m,x1} i_m i_{x1} + M_{m,x2} i_m i_{x2} + M_{m,y1} i_m i_{y1} + \\
 & + M_{m,y2} i_m i_{y2} + M_{x1,x2} i_{x1} i_{x2} + \\
 & + M_{x1,y1} i_{x1} i_{y1} + M_{x1,y2} i_{x1} i_{y2} + M_{x2,y1} i_{x2} i_{y1} + \\
 & + M_{x2,y2} i_{x2} i_{y2} + M_{y1,y2} i_{y1} i_{y2}. \quad (1)
 \end{aligned}$$

Исходя из геометрии магнитопровода машины и аналитических выражений для проводимости зазора [3] были получены выражения для собственных и взаимных индуктивностей контуров при следующих допущениях: не учитывались сопротивление магнитопровода, вихревые токи, индуктивности рассеяния и лобовых частей машины; зависимость проводимости воздушного зазора под зубцом статора аппроксимировалась косинусоидой, минимальная проводимость считалась равной нулю; зависимость индукции от напряженности магнитного поля — линейная, насыщение отсутствует. В силу малости смещения ротора величина, обратная высоте воздушного зазора, определена по формуле

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_0} \left(1 + \bar{x} \cos \varphi + \bar{y} \sin \varphi + \frac{1}{2} (\bar{x}^2 + \bar{y}^2) + \right. \\
 \left. + (\bar{x}\bar{y} \sin 2\varphi + \frac{1}{2} (\bar{x}^2 - \bar{y}^2)) \right),$$

где g_0 — зазор при центральном положении ротора; \bar{x}, \bar{y} — его смещение в относительных единицах; φ — текущая угловая координата.



Слагаемые второго порядка малости отбрасываются. В результате выражение для магнитной энергии принял вид

$$\begin{aligned}
 W = & \frac{1}{2}(8w_m^2 A_0)i_m^2 + \\
 & + \frac{1}{2} \left[8w_m^2 A_0 \frac{1}{2g_0^2} (x^2 + y^2) \right] i_m^2 + \frac{1}{2} 2w_s^2 A_0 \times \\
 & \times \left[\left(0,91 \frac{x}{g_0} + 0,83 \frac{x^2}{g_0^2} + 0,17 \frac{y^2}{g_0^2} - 0,18 \frac{y}{g_0} \cos(8\varphi) \right) i_{x1}^2 + \right. \\
 & + \left(-0,91 \frac{x}{g_0} + 0,83 \frac{x^2}{g_0^2} + 0,17 \frac{y^2}{g_0^2} + 0,18 \frac{y}{g_0} \cos(8\varphi) \right) i_{x2}^2 + \\
 & + \left. \left(0,91 \frac{y}{g_0} + 0,17 \frac{x^2}{g_0^2} + 0,83 \frac{y^2}{g_0^2} + 0,18 \frac{x}{g_0} \cos(8\varphi) \right) i_{y1}^2 \right] + \\
 & + \frac{w_m w_s A_0}{16} \times \\
 & \times \left[\left(-5,76 \frac{y}{g_0} - 8,86 \frac{xy}{g_0^2} + \left(32 + 28,96 \frac{x}{g_0} \right) \cos(8\varphi) \right) i_m i_{x1} + \right. \\
 & + \left(5,76 \frac{y}{g_0} - 8,86 \frac{xy}{g_0^2} + \left(32 - 28,96 \frac{x}{g_0} \right) \cos(8\varphi) \right) i_m i_{x2} + \\
 & + \left. \left(5,76 \frac{x}{g_0} + 8,86 \frac{xy}{g_0^2} + \left(32 + 28,96 \frac{y}{g_0} \right) \cos(8\varphi) \right) i_m i_{y1} + \right. \\
 & + \left. \left(-5,76 \frac{x}{g_0} + 8,86 \frac{xy}{g_0^2} + \left(32 - 28,96 \frac{y}{g_0} \right) \cos(8\varphi) \right) i_m i_{y2} \right] + \\
 & + \frac{w_s^2 A_0 0,068}{g_0^2} \left(y^2 i_{x1} i_{x2} - xy i_{x1} i_{y1} + xy i_{x1} i_{y2} + \right. \\
 & \left. + xy i_{x2} i_{y1} - xy i_{x2} i_{y2} + x^2 i_{y1} i_{y2} \right), \quad (2)
 \end{aligned}$$

где w_m , w_s — число витков обмотки привода и подвеса; A_0 — конструктивный коэффициент.

Радиальные силы F_x и F_y определяются как частные производные магнитной энергии соответственно по x и y . В матричной форме можно записать

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x^0 \\ F_y^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{xx} & c_{xy} \\ c_{yx} & c_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где F_x^0 , F_y^0 — основные (управляющие подвесом) силы, не зависящие от перемещений x и y ; c_{xx} , c_{xy} , c_{yx} , c_{yy} — «отрицательные» жесткости подвеса.

$$\begin{aligned}
 F_{x0} = & \frac{w_s^2 A_0}{g_0} \times \\
 & \times \left[0,91(i_{x1}^2 - i_{x2}^2) + 0,18(i_{y1}^2 - i_{y2}^2) \cos(8\varphi) \right] + \\
 & + \frac{w_m w_s A_0}{16g_0} i_m \times
 \end{aligned}$$

$$\times \left[5,76(i_{y1} - i_{y2}) + 28,96(i_{x1} - i_{x2}) \cos(8\varphi) \right]; \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 c_{xx} = & \frac{4w_m^2 A_0}{g_0^2} i_m^2 + \frac{w_m^2 A_0}{g_0} \times \\
 & \times \left[1,66(i_{x1}^2 + i_{x2}^2) + 0,34(i_{y1}^2 + i_{y2}^2) \right] + \\
 & + \frac{w_m^2 A_0 0,136}{g_0^2} i_{y1} i_{y2}; \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c_{xy} = & \frac{0,553 w_m w_s A_0 i_m}{g_0^2} (i_{y1} + i_{y2} - i_{x1} - i_{x2}) + \\
 & + \frac{0,068 w_s^2 A_0}{g_0^2} [(i_{x2} - i_{x1})(i_{y1} - i_{y2})]; \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{y0} = & \frac{w_s^2 A_0}{g_0} \times \\
 & \times \left[0,91(i_{y1}^2 - i_{y2}^2) + 0,18(i_{x1}^2 - i_{x2}^2) \cos(8\varphi) \right] + \\
 & + \frac{w_m w_s A_0}{16g_0} i_m \times \\
 & \times \left[5,76(i_{x2} - i_{x1}) + 28,96(i_{y1} - i_{y2}) \cos(8\varphi) \right]; \quad (7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c_{yy} = & \frac{4w_m^2 A_0}{g_0^2} i_m^2 + \frac{w_m^2 A_0}{g_0} \times \\
 & \times \left[1,66(i_{y1}^2 + i_{y2}^2) + 0,34(i_{x1}^2 + i_{x2}^2) \right] + \\
 & + \frac{w_s^2 A_0 0,136}{g_0^2} i_{x1} i_{x2}; \quad (8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c_{yx} = & \frac{0,553 w_m w_s A_0 i_m}{g_0^2} (i_{y1} + i_{y2} - i_{x1} - i_{x2}) + \\
 & + \frac{0,068 w_s^2 A_0}{g_0^2} [(i_{x2} - i_{x1})(i_{y1} - i_{y2})]. \quad (9)
 \end{aligned}$$



Магнитный подвес ротора БПИМ будем осуществлять по тому же принципу, что и АМП. Сигналы с датчиков положения подаются на регуляторы, которые формируют задающие силы F_x^* и F_y^* . Чтобы магнитный подвес осуществлял воздействия, аналогичные механическому подвесу на пружине с демпфером, — $\ddot{m}x = -b\dot{x} - cx$, используем ПД-регулятор с передаточной функцией $G_p = K_p + T_d s$. По значениям этих сил формируются командные токи, подаваемые через усилители Y в обмотки подвеса. Функциональная схема системы управления показана на рис. 2.

Система управления приводом содержит датчик угловой скорости ω^* и блок управления приводом. Датчик угла поворота ротора φ управляет очередностью импульсов тока i_m в обмотке привода, а амплитуда импульсов регулируется по величине рассогласования командной ω^* и действительной ω угловых скоростей.

Токи обмоток привода задаются в виде сумм

$$\begin{aligned} i_{x1} &= I_s + i_x \quad ; \quad i_{y1} = I_s + i_y \quad ; \\ i_{x2} &= I_s - i_x \quad ; \quad i_{y2} = I_s - i_y \quad , \end{aligned} \quad (10)$$

где $I_s = \text{const}$ — ток смещения; i_x и i_y — управляющие токи.

Различие в знаках управляющих токов соответствует дифференциальной схеме включения обмоток i_{x1} и i_{x2} , i_{y1} и i_{y2} . Подставляя (10) в (4) и (7), получим

$$F_{x0} = \frac{w_s A_0}{g_0} [3,62(w_s I_s + w_m i_m \cos(8\varphi)) i_x +$$

$$+ 0,72(w_m i_m + w_s I_s \cos(8\varphi)) i_y]; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} F_{y0} = \frac{w_s A_0}{g_0} [3,62(w_s I_s + w_m i_m \cos(8\varphi)) i_y + \\ + 0,72(w_m i_m + w_s I_s \cos(8\varphi)) i_x]. \end{aligned} \quad (12)$$

Таким образом, в отличие от АМП, здесь сила F_{x0} зависит не только от тока i_x , но и от тока i_y . В создании силы F_{y0} также участвует ток i_x . При этом происходит модуляция сил слагаемыми, которые содержат сомножитель $\cos(8\varphi)$. Подставим (10) в (5). Тогда

$$\begin{aligned} c_{xx} = \frac{4w_m^2 A_0}{g_0^2} i_m^2 + \\ + \frac{w_s^2 A_0}{g_0^2} [3,32(I_s^2 + i_x^2) + 0,68(I_s^2 + i_y^2)] + \\ + \frac{0,136 w_s^2 A_0}{g_0^2} (I_s^2 - i_y^2). \end{aligned}$$

Полагая $i_x, i_y \ll I_s$, получаем

$$c_{xx} = \frac{4A_0}{g_0^2} [(w_m i_m)^2 + (w_s i_s)^2]. \quad (13)$$

Аналогичное соотношение получаем для c_{yy} , подставляя (10) в (6):

$$c_{xy} = -\frac{0,27 w_s^2 A_0}{g_0} i_x i_y. \quad (14)$$

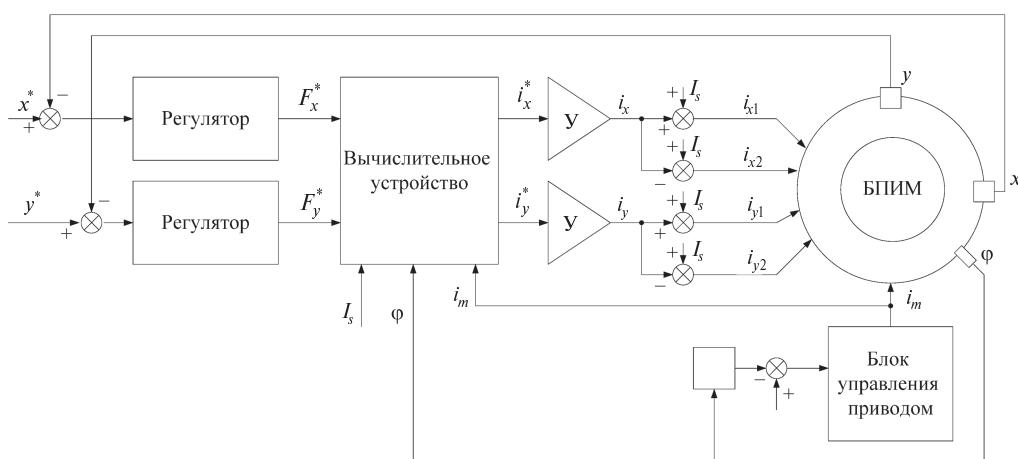


Рис. 2. Функциональная схема системы управления БПИМ

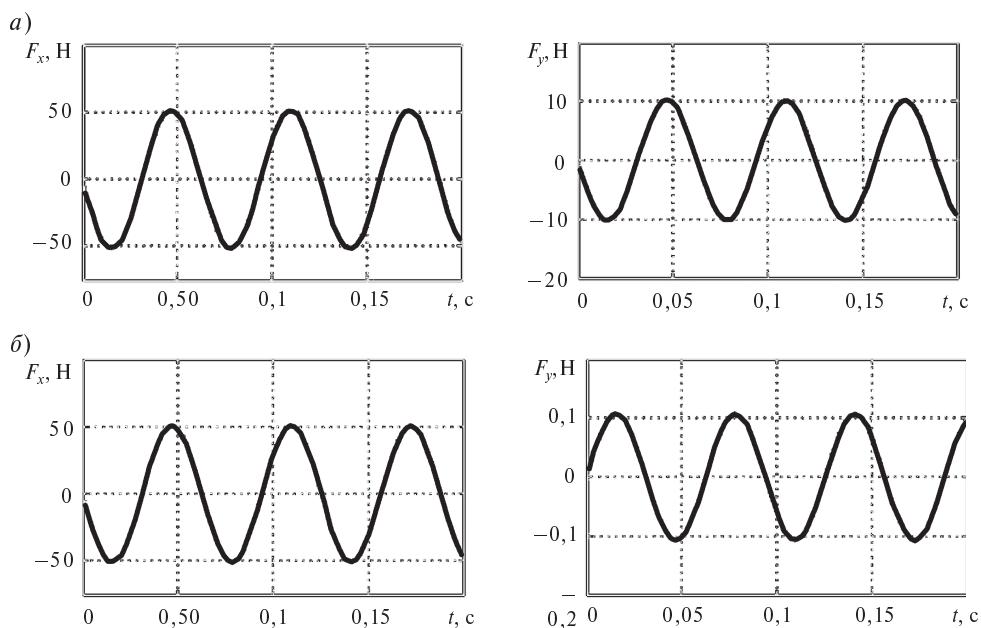


Рис. 3. Радиальные силы в БПИМ при гармоническом входном сигнале:
а — без снижения взаимовлияния; б — со снижением взаимовлияния

В силу малости \$i_x\$ и \$i_y\$ будем считать, что \$c_{xy} = c_{yx} = 0\$.

Итак, для радиальных сил имеем приближенные выражения

$$\begin{aligned} F_x &= ai_x + bi_y + cx; \\ F_y &= bi_x + ai_y + cy, \end{aligned} \quad (15)$$

где \$a\$ и \$b\$ — коэффициенты, зависящие от параметров машины, токов в обмотках и угла поворота ротора; \$c = c_{xx} = c_{yy}\$.

Как и в АМП, регулятор на основе обратных связей по перемещениям \$x\$ и \$y\$ вырабатывает мгновенные значения командных сил \$F_x^*\$ и \$F_y^*\$. Поэтому в системе управления подвесом должно быть устройство, которое по входным сигналам \$F_x^*\$ и \$F_y^*\$ вырабатывало бы командные токи \$i_x^*\$ и \$i_y^*\$. Выражая из (15) управляемые токи, получим соотношения

$$\begin{aligned} i_x^* &= \frac{1}{a^2 - b^2} [aF_x^* - bF_y^* - c(ax - by)]; \\ i_y^* &= \frac{1}{a^2 - b^2} [aF_y^* - bF_x^* - c(ay - bx)]. \end{aligned} \quad (16)$$

Перемещения \$x\$ и \$y\$ измеряются непосредственно с помощью датчиков перемещений. Для

вычисления коэффициентов \$a\$, \$b\$ и \$c\$ нужно знать в любой момент времени ток смещения \$I_s\$, ток в обмотке привода \$i_m\$ и угол поворота ротора \$\phi\$. Что касается измерений токов \$I_s\$ и \$i_m\$, то они производятся с помощью датчиков тока. Угол поворота ротора можно вычислить с помощью импульсного датчика положения и таймера.

По вышеописанным соотношениям была построена математическая модель в среде Simulink. Исследовались зависимости радиальных сил \$F_x\$ от времени при воздействии гармонического входного сигнала перемещения координаты \$y\$ (моделирование вращения ротора вокруг центра масс при расхождении его с геометрическим центром) для двух случаев формирования командных токов: аналогично АМП (рис. 3, а) и по закону (16), позволяющему компенсировать взаимное влияние радиальных сил (рис. 3, б). При этом сила \$F_y\$ имеет синусоидальный характер с амплитудой порядка 50 Н.

Как видно из графиков, предложенный закон управления позволяет существенно компенсировать влияние управляемой силы по оси \$y\$ на управляемую силу по оси \$x\$, что несомненно положительно сказывается на качестве управления подвесом в бесподшипниковой машине.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журавлев, Ю.Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение [Текст] / Ю.Н. Журавлев.— СПб.: Политехника, 2003.— 206 с.
2. Chiba, A. Magnetic Bearings and Bearingsless Drives [Текст] / A. Chiba T. Fyka, O. Ichikawa [и др.] // Изд-во ELSEVIER, 2005.— 381 с.
3. Постоянные магниты [Текст]: Справочник / А.Б. Альтман, А.Н. Герберг, П.А. Гладышев [и др.]; Под ред. Ю.М. Пятина— М.: Энергия, 1980.— 488 с.

УДК 621.643

Ю.С. Цыганкова

ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ ПОТЕРЬ ТЕПЛОТЫ В ТЕПЛОВЫХ СЕТЯХ

Тепловое хозяйство России в течение длительного периода времени развивалось по пути концентрации тепловых нагрузок и централизации теплоснабжения на основе комбинированной выработки тепловой и электрической энергии. Это обусловило значительную протяженность тепловых сетей в России [1]. В настоящее время их состояние специалистами оценивается как неудовлетворительное [2].

В современных условиях, когда проблеме энергосбережения уделяется значительное внимание [3], необходимым условием экономически эффективной работы тепловых сетей является снижение непроизводительных потерь теплоты через теплоизоляционные конструкции при транспортировке тепловой энергии [4].

Согласно нормам [5] все трубопроводы, используемые при транспортировке теплоты, должны быть изолированы. Несмотря на это, на практике могут возникать ситуации, когда отдельные участки трубопроводов имеют увлажненную или деформированную тепловую изоляцию либо вообще лишены ее. Такое состояние изоляционной конструкции может быть вызвано различными негативными факторами, возникающими в процессе эксплуатации теплотрассы (затопление непроходных каналов дождевыми, грутовыми или талыми водами, аварии в системе теплоснабжения и водоотведения, резкие перепады температуры окружающей среды, длительная эксплуатация). В этих условиях фактическое значение коэффициента теплопроводности теплоизоляции трубопро-

вода отличается от справочного значения [6]. Аналитический способ определения тепловых потерь [6] не учитывает влияние перечисленных факторов и соответственно приводит к недостаточно точному расчету транспортных тепловых потерь.

Цель нашей работы — предложить новый подход к расчету фактических потерь теплоты на каждом характерном участке тепловой сети, который учитывал бы не только геометрические характеристики и способы прокладки трубопроводов, но и влияние нештатных условий эксплуатации и реального технического состояния изоляции на изменение тепловых потерь.

Постановка задачи

В качестве примера рассматривается фрагмент типичной двухтрубной тепловой сети г. Кемерово (рис.1). Тип изоляции на участках L1–L19 — пенополиуритан (ППУ), толщина которого принята согласно [7], на участках L20–L26 — минеральная вата (МВ) с толщиной согласно [6]. Преимущественный способ прокладки — подземный в непроходном канале, на участках L6–L10 — надземный. Расчет тепловых потерь при качественном регулировании проводится при средних климатических условиях района [5]. Для г. Кемерово согласно СНиП 23-01-99 температура наружного воздуха — 273 К, средняя температура грунта на глубине заложения (8 м) подземного трубопровода — 278 К, температура прямой сетевой воды — 363 К, температура обратной сетевой воды — 323 К.

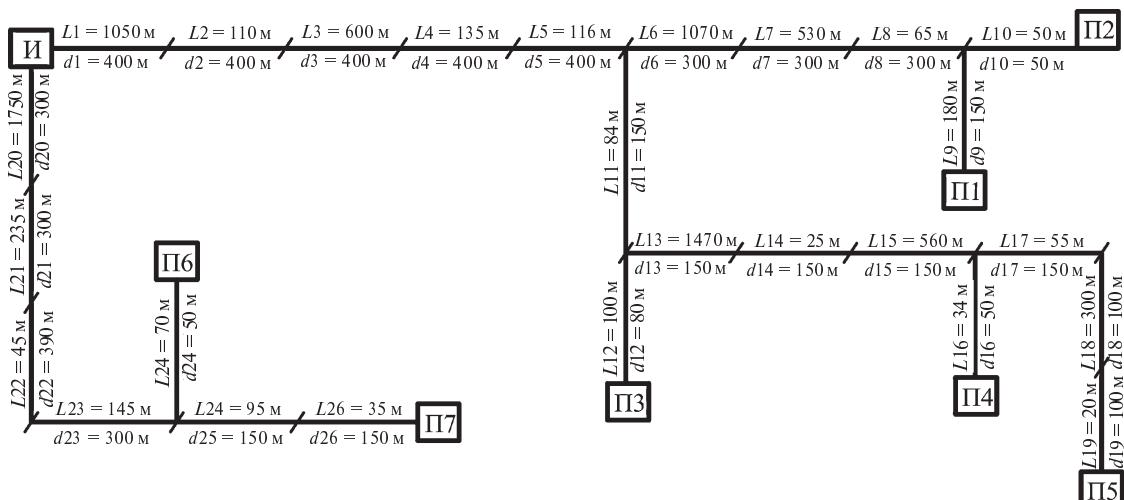


Рис. 1. Схема рассматриваемой двухтрубной тепловой сети:

$L1-L26$ — длины характерных участков тепловой сети с различными условиями прокладки и состоянием изоляции; $d1-d26$ — условные диаметры трубопроводов; И — источник теплоты; П1–П7 — потребители

Задача определения потерь теплоты для рассматриваемой тепловой сети (см. рис. 1) решалась с учетом следующих допущений:

теплофизические характеристики веществ — постоянны и известны. В рассматриваемом диапазоне изменения основных влияющих параметров (температура, давление) теплофизические свойства веществ, используемых в данной работе при анализе тепловых потерь трубопроводов, изменяются незначительно [5–7], и этим изменением можно обоснованно пренебречь;

изменение значений коэффициентов теплоотдачи от поверхности изолированного трубопровода к окружающей среде в результате падения температуры теплоносителя не оказывает существенного влияния на изменение тепловых потерь [8];

не учитываются термические сопротивление стенок трубопроводов и канала, поскольку они много меньше термического сопротивления слоя изоляции [8];

отсутствуют утечки теплоносителя.

При проведении исследований рассматривался ряд наиболее типичных [9–11] нештатных режимов работы тепловых сетей:

увлажнение тепловой изоляции от незначительного (10 %) и до полного (100 %); увлажнение изоляции с затоплением канала (100 %);

высокая (около 100 %) относительная влажность воздуха в канале;

отсутствие изоляции на теплопроводе;

деформация теплоизоляционного покрытия.

В случае увлажнения тепловой изоляции трубопровода потери теплоты возрастают за счет увеличения эффективной теплопроводности материала изоляционного покрытия. Эффективную теплопроводность увлажненной изоляции можно рассчитать по выражению [9]

$$\lambda_{\text{эфф}} = \lambda_{\text{из}} \varphi_{\text{из}} + \lambda_{\text{ж}} \varphi_{\text{ж}}, \quad (1)$$

где $\varphi_{\text{из}}$, $\varphi_{\text{ж}}$ — объемная доля соответственно теплоизоляции и жидкости; $\lambda_{\text{из}}$, $\lambda_{\text{ж}}$ — коэффициенты теплопроводности изоляции и жидкости, Вт/(м·К).

Наличие влажного воздуха в канале также приводит к увлажнению тепловой изоляции трубопроводов. Эффективная теплопроводность в этом случае рассчитывается по выражению (1), но количество влаги ограничивается допустимым влагосодержанием воздуха, поэтому объемная доля жидкости в изоляции равна $\varphi_{\text{ж}} = 0,0126$ [9].

Нередко при проведении обследований встречается деформация теплоизоляционных конструкций на горизонтальных участках трубопроводов. В процессе длительной эксплуатации происходит уплотнение, уменьшение толщины теплоизоляционного слоя в верхней части конструкции и образование воздушной прослойки между трубой и теплоизоляционным слоем в ее нижней части, что существенно снижает теплозащитные свойства конструкции [12]. В ра-



счетах рассматривался вариант достаточно умеренной деформации слоя тепловой изоляции [10]. Наличие деформации изоляции теплопровода учитывалось уменьшением толщины слоя в верхней части и провисанием теплоизоляции в нижней части на величину, равную полутора толщине изоляции [10]. Толщина воздушной прослойки соответствовала толщине слоя тепловой изоляции в верхней части конструкции [10]. Тепловые потери теплопровода в этих условиях вычислялись по методике, описанной в [10].

Результаты расчетов и их обсуждение

Основные результаты анализа тепловых потерь представлены в табл. 1 и на рис. 2. В табл. 1 приведены значения нормативных ($Q_{\text{норм}}$), про-

ектных ($Q_{\text{пр}}$), расчетных (фактических $Q_{\text{факт}}$) тепловых потерь и сравнение фактических потерь с проектными. Проектные потери — это потери теплоты при штатных условиях эксплуатации тепловых сетей (трубопроводы изолированы в соответствии с [6], изоляция находится в сухом состоянии, воздух в каналах сухой).

Масштабность негативных факторов, влияющих на изменение тепловых потерь, выбрана на основании исследований [12, 13] и является достаточно типичной для реальных условий эксплуатации тепловых сетей.

Результаты расчетов, приведенные в табл. 1 и на рис. 2, подтверждают ожидаемый рост фактических потерь теплоты относительно проектных при учете влияния эксплуатационных факторов

Таблица 1

Результаты расчета тепловых потерь

Потре- битель	Длина ТС, м	Условия прокладки	Тепловые потери, кВт			$Q_{\text{факт}}/Q_{\text{пр}}$
			Норма	Проект	Факт	
П1	3856	33,1 % — влажный воздух в канале, 15,6 % — деформация изоляции, 4,7 % — отсутствует изоляция, 3,5 % — 100 %-е увлажнение изоляции	330,12	217,34	645,29	3,0
П2	3726	34,2 % — влажный воздух в канале, 16,1 % — деформация изоляции, 3,6 % — 100 %-е увлажнение изоляции, 1,3 % — отсутствует изоляция	321,79	211,01	301,78	1,4
П3	2195	58,1 % — влажный воздух в канале, 31,9 % — деформация изоляции, 10 % — 100 %-е увлажнение изоляции	173,73	118,10	159,97	1,4
П4	4184	30,5 % — влажный воздух в канале, 14,3 % — деформация изоляции, 13,4 % — 40 %-е увлажнение изоляции, 5,2 % — 100 %-е увлажнение изоляции, 1,4 % — отсутствует изоляция	259,77	188,10	258,34	1,4
П5	4525	28,2 % — влажный воздух в канале, 13,3 % — деформация изоляции, 12,4 % — 40 %-е увлажнение изоляции, 12,7 % — 100 %-е увлажнение изоляции, 1 % — отсутствует изоляция	274,01	198,99	285,81	1,4
П6	2620	9 % — 100 %-е увлажнение изоляции,	149,72	175,09	214,74	1,2
П7	2675	10 % — 100 %-е увлажнение изоляции, 3,4 % — 60 %-е увлажнение изоляции	153,28	179,46	233,76	1,3

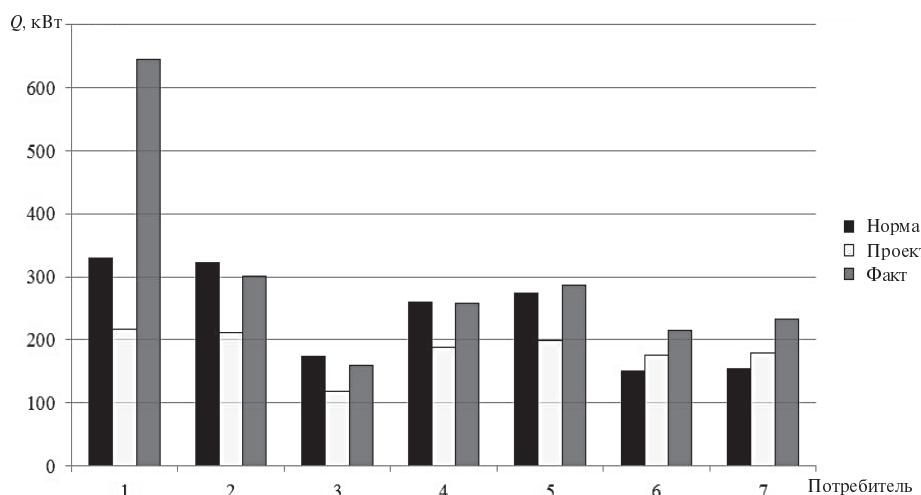


Рис. 2. Сравнение нормативных, проектных и фактических потерь тепла

на термическое сопротивление рассматриваемых типов изоляции. Например, для потребителя П2 при наличии влажного воздуха в непроходных каналах на протяжении 34 % от общей длины тепловой сети, деформации изоляции (16 % длины), полном увлажнении изоляции (4 % длины) и отсутствии изоляции (1 % длины) потери возрастают в 1,4 раза от уровня проектных потерь, рассчитанных по методике [6]. Для потребителя П7 при полном увлажнении изоляции на 10 % протяженности теплотрассы и частичном (до 60 %) увлажнении на 3 % протяженности теплотрассы тепловые потери возрастают в 1,3 раза относительно проектных. Аналогично для оставшихся потребителей (П1, П3, П4, П5, П6) в зависимости от масштабности и значимости негативных факторов наблюдается закономерный значительный рост тепловых потерь через теплоизоляционные конструкции. Полученные результаты служат доказательством целесообразности применения предлагаемого декомпозиционного подхода при определении фактических потерь теплоты теплопроводов. Такой подход позволяет более достоверно оценивать тепловые потери в действующих тепловых сетях по сравнению с методикой [6] и выявлять участки теплопроводов, где есть потенциал для снижения тепловых потерь.

Сопоставление расчетных потерь теплоты с допустимыми [14] для потребителей П2, П3, П4 свидетельствует о том, что суммарные тепловые потери не превышают нормативные, несмотря на ввод возможных нештатных условий

эксплуатации. Это объясняется тем, что действующие нормы [14] рассчитаны на материалы изоляции с низким термическим сопротивлением (такие, как минеральная вата), но оказываются завышенными для современных типов изоляции с высоким термическим сопротивлением. Увеличение транспортных потерь теплоты, не превосходящее установленные нормы [14], не контролируется эксплуатирующими компаниями ввиду отсутствия официальной методики расчета тепловых потерь, которая учитывает изменение теплозащитных свойств изоляции в процессе эксплуатации. Следовательно, существующие нормативные документы не отражают возможный потенциал энергосбережения в системе транспорта тепловой энергии.

Предлагаемый декомпозиционный подход к определению тепловых потерь позволяет не только выявить возможный потенциал энергосбережения, но и обосновать выбор участков тепловых сетей, требующих оперативного ремонта. Своевременные ремонтные работы и оперативное реагирование теплоснабжающих компаний на нештатные условия эксплуатации тепловых сетей избавят потребителей от завышенных платежей и обеспечат выполнение программы энергосбережения, обозначенной в ФЗ № 261 от 23 ноября 2009 года.

Для анализа степени влияния эксплуатационных факторов на изменение удельных тепловых потерь рассмотрим подземный трубопровод с условным диаметром $d_y = 400$ мм, изолирован-



ного ППУ и проложенного в непроходном канале. В табл. 2 приведены результаты расчетов удельных тепловых потерь раздельно для подающего и обратного трубопровода и дано сравнение фактических потерь ($q_{\text{факт}}$) с проектными ($q_{\text{пр}}$).

Из табл. 2 видно, как влияют на увеличение удельных тепловых потерь различные нештатные условия эксплуатации тепловых сетей. Наличие влажного воздуха в канале приводит к увеличению потерь теплоты по сравнению с проектными условиями эксплуатации в 1,27 раза для подающего трубопровода и в 1,23 раза для обратного. При увеличении влагосодержания изоляции тепловые потери возрастают пропорционально изменению объемной доли влаги в структуре изоляции и в предельном случае (100 %-е увлажнение) превышают проектные в 2,75 раза для подающего и 2,26 для обратного трубопроводов. Деформация слоя изоляции приводит к увеличению потерь теплоты в подающем трубопроводе в 1,18 раза, а в обратном — в 1,16 раза.

Наибольшие потери имеют место при отсутствии изоляции на трубопроводе. Для этого случая потери подающего трубопровода возрастают более чем в 12 раз. В результате сильного теплоотвода от подающего трубопровода температура воздуха в канале растет и превышает температуру теплоносителя в обратном трубопроводе. Для рассматриваемых условий эксплуатации температура воздуха в канале превысила температуру обратной сетевой воды на 5 °C. По этой

причине потери теплоты обратным трубопроводом при отсутствии изоляции имеют отрицательное значение (см. табл. 2). Таким образом, теплоноситель в обратном трубопроводе нагревается от воздуха в канале.

Следует отметить, что температура обратной сетевой воды контролируется на источнике теплоснабжения и оговаривается при заключении договоров поставки теплоты потребителям. Значение температуры обратной сетевой воды — одна из основных режимных характеристик, используемых при анализе состояния тепловых сетей и эффективности работы системы теплоснабжения. Завышенная температура обратной сетевой воды — результат ненормативной работы системы теплоснабжения. Теплоисточники на температуру возвращаемой сетевой воды повлиять не могут, поэтому за повышенную температуру обратной воды для потребителей (ЖКХ, предприятия и др.) предусмотрены штрафы.

Удельные нормативные потери для подземного трубопровода $d_y = 400$ мм прокладки 2004 года составляют 83 Вт/м [14]. Суммарные потери для подающего и обратного трубопроводов в проектных условиях (см. табл. 2) равны 56,4 Вт/м. Следовательно, нормативные потери при ППУ изоляции завышены на 32 % относительно проектных. Это обстоятельство подтверждает сделанный ранее вывод о том, что существующие нормативные документы не подходят для оцен-

Таблица 2

**Сравнение удельных потерь теплоты
при различных условиях эксплуатации и состоянии изоляции**

Условия эксплуатации	Удельные расчетные потери, Вт/м		$q_{\text{факт}}/q_{\text{проект}}$	
	в подающем трубопроводе	в обратном трубопроводе	в подающем трубопроводе	в обратном трубопроводе
Проектные	37,9	18,5	1	1
Влажный воздух в канале	48,1	22,8	1,27	1,23
Увлажнение изоляции на 10 %	46,1	22,0	1,22	1,19
Увлажнение изоляции на 70 %	87,3	37,0	2,30	2,00
Увлажнение изоляции на 100 %	104,1	41,7	2,75	2,26
Отсутствует изоляция	465,4	-66,2	12,28	-3,58
Деформация изоляции	44,8	21,4	1,18	1,16

ки потерю теплоты современными типами изоляционных конструкций с высоким термическим сопротивлением. Опираясь на полученные результаты, можно утверждать, что целесообразно ввести в удельные нормативные потери [14] градацию по величине термического сопротивления изоляционного материала. Например, для материалов с высоким термическим сопротивлением, таких, как ППУ изоляция, можно рекомендовать ужесточение нормативных потерь не менее чем на 30 %.

Продемонстрированы значительные преимущества декомпозиционного подхода в плане точности определения фактических потерь теплоты с учетом условий эксплуатации и технического

состояния изоляции на каждом характерном участке трубопровода по сравнению с существующей методикой расчета.

Предлагаемый подход позволяет выявлять возможные пути уменьшения тепловых потерь в сетях централизованного теплоснабжения.

Показан потенциал энергосбережения при транспортировке теплоты в тепловых сетях.

Обоснована целесообразность ужесточения нормативных тепловых потерь для трубопроводов, изолированных современными материалами.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (ГК № П1445 от 03.09.09) и гранта президента РФ (грант № МК-1284.2011.8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слепченок, В.С. Система теплоснабжения Санкт-Петербурга на современном этапе и возможности ее модернизации [Текст] / В.С. Слепченок, Г.П. Петраков // Инженерно-строительный журнал.— 2009. № 7.— С. 26–29.
2. Слепченок, В.С. Повышение энергоэффективности теплоизоляции трубопроводов тепловых сетей северных и северо–восточных регионов России [Текст] / В.С. Слепченок, Г.П. Петраков // Инженерно-строительный журнал.— 2011. № 4.— С. 26–32.
3. Аверьянова, О.В. Энергосбережение в тепловых сетях за счет параметра теплоносителя [Текст] / О.В. Аверьянова // Инженерно-строительный журнал.— 2009. № 5.— С. 43–46.
4. Лундышев, И.А. Перспективные технологии и применения монолитного пенобетона для теплоизоляции трубопроводов [Текст] / И.А. Лундышев // Инженерно-строительный журнал.— 2008. № 1.— С. 38–41.
5. СНиП 41.03–2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов [Текст].— М.: Изд-во стандартов, 2004.— 25 с.
6. СП 41–103–2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов [Текст] / Госстрой России.— М., 2001.— 42 с.
7. ГОСТ 30732–2006. Трубы и фасонные изделия стальные с тепловой изоляцией из пенополиуретана с защитной оболочкой [Текст].— М.: ФГУП «Стандартинформ», 2007.— 49 с.
8. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети [Текст]: учебник для вузов / Е.Я. Соколов.— М.: Изд. дом МЭИ, 2006.— 472 с.
9. Кузнецов, Г.В. Анализ тепловых потерь теплотрубопроводов в условиях взаимодействия с влажным воздухом [Текст] / Г.В. Кузнецов, В.Ю. Половников // Энергосбережение и водоподготовка.— 2009. № 2 (58).— С. 37–40.
10. Рахимова, Ю.Н. Анализ тепловых потерь теплотрубопроводов в условиях деформации и нарушения целостности теплоизоляции [Текст] / Ю.Н. Рахимова // Современные техника и технологии: Матер. XVII Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых.— Томск, 2011.— Т. 3.— С. 257–258.
11. Кузнецов, Г.В. Численный анализ потерь тепла магистральными теплопроводами в условиях полного или частичного затопления [Текст] / Г.В. Кузнецов, В.Ю. Половников // Инженерно-физический журнал.— 2008.— Т. 81, № 2.— С. 303–311.
12. Шойхет, Б.М. Обследование технического состояния и реконструкция тепловой изоляции эксплуатируемых магистральных теплопроводов [Текст] / Б.М. Шойхет, Л.В. Ставрицкая // Энергосбережение.— 2002. № 3.— С. 60–62.
13. Слепченок, В.С. Влияние различных эксплуатационных факторов на тепловые потери в бесканальных подземных трубопроводах тепловой сети [Текст] / В.С. Слепченок, А.Н. Рондель, Н.Н. Шаповалов // Новости теплоснабжения.— 2002. № 6.— С. 18–23.
14. ФЗ № 325 от 30 декабря 2008 г. «Об организации в министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии».



УДК 621.311.1

Д.А. Устинов, Ю.В. Коновалов, И.Г. Плотников

ПАСПОРТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В Законе об энергосбережении ставится задача снижения энергетической составляющей в себестоимости продукции [1]. Эта задача может быть решена путем паспортизации электрических нагрузок предприятий. Цель паспортизации электрических нагрузок предприятия — построение профилей графиков нагрузки по отдельным подстанциям, а также определение профиля усредненного графика нагрузки нефтегазодобывающего предприятия (НГДП) в целом путем суммирования профилей графиков отдельных подстанций; вычисление по полученным графикам коэффициентов формы, заполнения, равномерности, определение максимальных, минимальных и средних нагрузок по тарифным зонам.

Полученные значения служат основой для проведения координации электрических нагрузок предприятия. Координация электрических нагрузок — это приближение электрических нагрузок предприятия к их оптимальным значениям, обеспечивающим минимизацию энергетической составляющей в себестоимости продукции с учетом дифференцированных тарифов оплаты за электроэнергию.

С целью паспортизации электрических нагрузок предприятий, входящих в состав ОАО «Татнефть», были выполнены замеры по потреблению активной и реактивной мощности в точках учета, по которым ведутся расчеты с энерgosнабжающими компаниями. Замеры выполнялись на шинах промысловых подстанций с использованием многофункциональных микропроцессорных счетчиков электрической энергии «Альфа». Состав промысловой нагрузки, подключенной к шинам подстанций, достаточно четко структурирован по технологическим процессам, что позволяет создать обобщенную схему электроснабжения промысловой подстанции с территориально рассредоточенными объектами, приведенную к шинам 6 (10) кВ. Схема показана на рис. 1, где приняты следующие обозначения: ИЭ — источник энергии; Л1 — линия электропередачи (ЛЭП) от ИЭ до подстанции НГДП; Л2 — линии элект-

ропередачи, питающие комплектные трансформаторные подстанции (КТП) 6 (10) /0,4 кВ основных электроприемников механизированной добычи нефти; Л3 — линии электропередачи, питающие высоковольтные электроприемники систем поддержания пластового давления (ППД), первичной подготовки и перекачки товарной нефти; Л4 — линии электропередачи, питающие электродвигатели 0,4 кВ станков-качалок (СКН); Л5 — линии электропередачи, питающие погружные электродвигатели (ПЭД) установок электроцентробежных насосов (УЭЦН); Т1 и Т2 — трансформаторы КТП 6 (10) /0,4 кВ, предназначенные для питания СКН и низковольтных потребителей механизированной добычи нефти; Т3 — понижающий трансформатор КТП

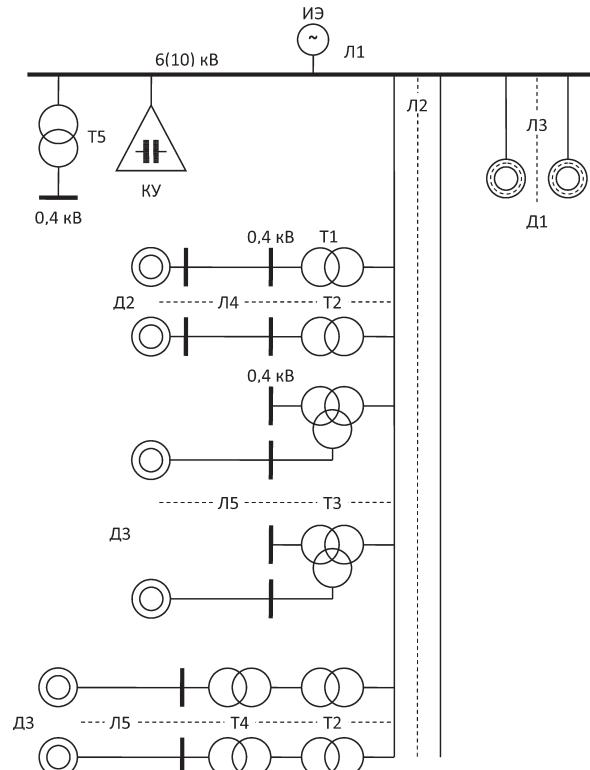


Рис. 1. Обобщенная схема электроснабжения промысловой подстанции с территориально рассредоточенными нагрузками

(КТППН) 6 (10) /0,4/U_{уЭЦН} кВ, предназначенный для питания УЭЦН и низковольтных потребителей механизированной добычи нефти; Т4 — повышающий трансформатор 0,4/U_{уЭЦН} кВ, предназначенный для питания УЭЦН; Т5 — трансформатор 6 (10) /0,4 кВ собственных нужд промысловой подстанции НГДП; КУ — конденсаторная установка, подключенная к шинам подстанций 6 (10) кВ промысловых подстанций НГДП; Д1 — высоковольтные двигатели систем ППД, первичной подготовки и перекачки товарной нефти, подключенные к шинам промысловых подстанций НГДП напряжением 6 (10) кВ; Д2 — низковольтные электродвигатели СКН; Д3 — погружные электрические двигатели.

По результатам замеров были построены профили графиков нагрузок отдельных подстанций и определены профили усредненных графиков нагрузки НГДП в целом путем суммирования профилей графиков отдельных подстанций.

В результате обработки профилей нагрузки были определены такие показатели графиков нагрузки, как коэффициенты формы K_{ϕ} , заполнения $K_{зап}$ и равномерности $K_{пав}$, по следующим формулам:

для активной мощности (P)

$$K_{\phi}^P = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{48} P_i^2}}{P_{cp}} = \frac{P_{cp,kv}}{P_{cp}}; \quad K_{зап}^P = \frac{P_{cp}}{P_{max}};$$

$$K_{пав}^P = \frac{P_{min}}{P_{max}};$$

для реактивной мощности (Q)

$$K_{\phi}^Q = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{48} Q_i^2}}{Q_{cp}} = \frac{Q_{cp,kv}}{Q_{cp}}; \quad K_{зап}^Q = \frac{Q_{cp}}{Q_{max}};$$

$$K_{пав}^Q = \frac{Q_{min}}{Q_{max}}.$$

Обработка результатов замеров [2, 3] показала, что коэффициенты формы графиков активной мощности (K_{ϕ}^P) на отдельных подстанциях находятся в пределах 1,0–1,089. Коэффициент формы усредненного графика активной мощности фактически равен единице: $K_{\phi}^P = 1,001$. Из этого следует, что потери электроэнергии в ли-

ниях, питающих подстанции НГДП, практически не зависят от формы профиля графика.

Коэффициенты заполнения графиков активной мощности ($K_{зап}^P$) на отдельных подстанциях находятся в пределах 0,55–0,99. Коэффициент заполнения усредненного графика активной мощности составляет 0,91. Из этого следует, что имеется возможность выработки регулировочных мероприятий по уменьшению потребления активной мощности в часы максимума нагрузки, которое может составлять в среднем до 10 % от заявленного максимума.

Коэффициенты равномерности графиков активной мощности ($K_{пав}^P$) по отдельным подстанциям находятся в пределах 0,06–0,95. Минимальные значения указанных коэффициентов имеют место на слабо загруженных подстанциях. Коэффициент равномерности усредненного графика активной нагрузки составляет 0,77.

Коэффициенты формы графиков реактивной мощности (K_{ϕ}^Q) на отдельных подстанциях находятся в пределах 1,0–1,045. Коэффициент формы усредненного графика реактивной мощности составляет 1,001.

Коэффициенты заполнения графиков реактивной мощности ($K_{зап}^Q$) на отдельных подстанциях находятся в пределах 0,72–0,96. Коэффициент заполнения усредненного графика реактивной мощности составляет 0,92. По профилю графиков реактивной мощности при подключении к шинам подстанции синхронных двигателей видно, что при проведении регулировочных мероприятий имеет место увеличение потребления реактивной мощности по отдельным вводам и соответственно $\operatorname{tg}\phi$. Отсюда следует, что проведение регулировочных мероприятий по активной мощности требует синхронизации с проведением мероприятий по компенсации реактивной мощности.

Коэффициенты равномерности графиков реактивной мощности ($K_{пав}^Q$) на отдельных подстанциях находятся в пределах 0,244–0,908. Минимальные значения указанных коэффициентов имеют место на подстанциях, где значительна асинхронная двигательная нагрузка и не используются средства компенсации реактивной мощности. Коэффициент равномерности усредненного графика реактивной мощности составляет 0,784.



Рассмотрение $\operatorname{tg}\phi$, т. е. отношений реактивных мощностей к активным, показывает следующее: максимальные усредненные за 30 минут значения $\operatorname{tg}\phi$ на отдельных подстанциях находятся в пределах 0,33–1,95; минимальные — в пределах 0,09–1,78. Слабозагруженные по активной мощности подстанции при определении значений $\operatorname{tg}\phi$ не учитывались. Для усредненного графика нагрузки $\operatorname{tg}\phi_{cp}$ составляет 0,4.

Как показал анализ профилей нагрузки по отдельным подстанциям и НГДП в целом, распределение доли потребления электроэнергии (коэффициент потребления) по зонам суток изменяется в указанных ниже пределах (подстрочные индексы п соответствуют пиковому, пп — полу涓кому, н — ночному временному интервалу суток; подстрочный индекс ср указывает, что это среднее значение данного коэффициента):

K_p	0,123–0,141
$K_{p\text{ср}}$	0,13
$K_{\text{пп}}$	0,232–0,339
$K_{\text{ппср}}$	0,275
K_n	0,520–0,645
$K_{n\text{ср}}$	0,58

Для ОАО «Татнефть» тарифные зоны приведены в таблице.

Рассмотрение профилей усредненных графиков нагрузки нефтегазодобывающих предприятий показало, что в летний период вечерние пики нагрузок оказались выше утренних, в зимний период наоборот — утренние пики выше вечерних. Внутри как утренней, так и вечерней зон максимальные нагрузки попадают на их границы. Подобная тенденция прослеживается практически по всем подстанциям как по активной, так и по реактивной мощности. Этот факт указывает на то, что имеет место запаздывание регулировочных мероприятий при подходе к пиковым зонам и ускоренный набор нагрузки до их окончания.

В рамках выполняемой паспортизации на подстанциях определены коэффициенты загруз-

ки силовых трансформаторов для пиковых (K_{3p}), полу涓ковых (K_{3pp}) и ночных (K_{3n}) временных интервалов суток. Пределы изменения коэффициентов загрузки и их средние значения оказались следующими:

K_{3p}	0,151–0,825
$K_{3p\text{ср}}$	0,49
K_{3pp}	0,149–0,904
$K_{3pp\text{ср}}$	0,53
K_{3n}	0,15–0,951
$K_{3n\text{ср}}$	0,55

Из этих данных следует, что силовые трансформаторы многих подстанций не загружены на номинальную мощность, следовательно, имеется резерв развития производства для подключения дополнительных нагрузок.

Приведенные данные по коэффициентам потребления и загрузки показывают, что на предприятиях ОАО «Татнефть» уже частично реализуются мероприятия по переносу электропотребления в тарифные зоны суток с наименьшей оплатой: средний коэффициент потребления электроэнергии и средний коэффициент загрузки трансформаторов в ночные зоны выше, чем в пиковые и полу涓ковые.

Выполненная паспортизация электрических нагрузок нефтегазодобывающих предприятий ОАО «Татнефть» позволила получить усредненный график нагрузки нефтепромысловых распределительных подстанций ОАО «Татнефть», представленный на рис. 2. Он характеризуется следующими параметрами:

для суточного получасового графика активной мощности

$$K_{\Phi}^P = 1,001; K_{\text{зап}}^P = 0,91; K_{\text{пав}}^P = 0,77;$$

для суточного получасового графика реактивной мощности

$$K_{\Phi}^Q = 1,001; K_{\text{зап}}^Q = 0,92; K_{\text{пав}}^Q = 0,784.$$

Тарифные зоны суток

Название зоны	Часы суток
Пиковая зона в рабочие дни	8–10 ч и 16–19 ч для 1 и 4 кварталов 8–10 ч и 19–22 ч для 2 и 3 кварталов
Полув涓ковая зона в рабочие дни	7–8 ч; 10–16 ч и 19–23 ч для 1 и 4 кварталов 7–8 ч; 10–19 ч и 22–23 ч для 2 и 3 кварталов
Ночная зона в рабочие дни	23–7 ч. в рабочие дни; круглосуточно в субботние, выходные и праздничные дни

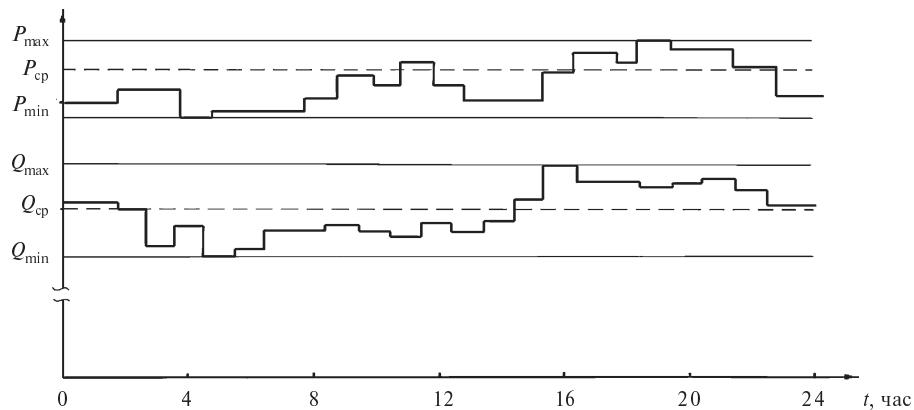


Рис. 2. Усредненные графики электрических нагрузок нефтепромысловых распределительных подстанций ОАО «Татнефть»

Отношение средних значений реактивной мощности к активной, т. е. $\text{tg}\varphi_{\text{cp}}$, равно 0,4.

Полученные профили графиков электрических нагрузок позволяют осуществить координацию электрических нагрузок преобразованием профилей графиков в соответствии с технико-экономическими ограничениями, направленными на снижение энергетической составляющей в себестоимости продукции. Показатели, характеризующие профили графиков электрических нагрузок отдельных подстанций и НГДП в це-

лом, могут рассматриваться как паспорт электрических нагрузок предприятия.

Учитывая непрерывность технологического процесса добычи нефти, минимизация энергетической составляющей в себестоимости продукции может быть получена путем управления режимами напряжения и реактивной мощности, а также за счет преобразования формы графика электропотребления и уменьшения заявленной мощности в часы максимума нагрузки энергосистемы на основании данных паспортизации электрических нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
2. Абрамович, Б.Н. Реконструкция систем коммерческого учета электропотребления нефтегазодобывающих предприятий [Текст] / Б.Н. Абрамо-
- вич, А.В. Сираев // Матер. 7-й Междунар. конф. «Новые идеи в науках о земле». — М., 2005 г.
3. Сираев, А.В. Паспортизация и координация электрических нагрузок НГДУ «Бавлынефть» с целью экономии оплаты за электроэнергию в условиях дифференцированных тарифов [Текст] / А.В. Сираев // Энергетика в нефтегазодобыче.— 2003. № 2–3.

УДК 621.384:621.68

А.В. Тананаев

ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В БЛАНКЕТЕ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

В статье рассмотрены некоторые проблемы разработки и исследования жидкometаллических систем термоядерных реакторов, которые в последние годы стимулировали в основном развитие магнитной гидродинамики. В первую очередь

это относится к изучению течений проводящих сред в сильных магнитных полях.

Жидкие металлы (ЖМ) в термоядерных реакторах (ТЯР) с магнитным удержанием могут быть применены в системах теплообмена и наработки



трития, в устройствах контроля примесей в плазме и защиты первой стенки.

В зависимости от функции системы или устройства ТЯР выбираются соответствующие жидкие металлы или сплавы на их основе. Так, в системе теплообмена (бланкет) предпочтение отдается литию, свинцу и их сплавам, благодаря их высоким теплофизическими свойствами, радиационной стойкости и низким давлениям паров. Вместе с тем литий может служить и как исходный материал для наработки трития. С помощью жидкometаллических контактных устройств (ЖМКУ) решается сложная проблема взаимодействия плазмы со стенкой камеры реактора и поддержания необходимого состава плазмы. Решение этой проблемы основано, в частности, на идее создания постоянно возобновляемой рабочей поверхности, которую легче всего осуществить с помощью жидких металлов в виде течений со свободной поверхностью — пленочных, струйных, капельных. При этом по совокупности необходимых качеств в первую очередь рассматриваются галлий, алюминий, эвтектика алюминий—кремний [1].

Бланкет термоядерного реактора

Предварительные замечания. Обзорные работы [2, 5] и технико-экономические исследования [6, 7] подтверждают, что ЖМ по-прежнему остаются одной из перспективных сред для бланкетов ТЯР. За последние годы предложен ряд новых концептуальных проектов ЖМ-бланкетов.

Наибольшее развитие получили две основные концепции организации течения в бланкете, обеспечивающие наименьшее перепады давления: тороидально-полоидальная схема (рис. 1) и полоидальная схема (рис. 2).

При тороидально-полоидальной схеме ЖМ течет в направлении поля только в каналах охлаждения первой стенки, что позволяет организовать эффективный теплосъем (за счет больших скоростей течения) при небольших гидравлических потерях в канале. К тороидальным каналам металл подводится системой наклонных к тороидальному полю каналов большого сечения. Скорость металла в них малая, а следовательно, малыми будут перепады давления. Такой вариант течения в бланкете принят в проектах NET [8] и BCSS [6].

Полоидальная концепция принята в качестве основной в TPSS [9], SCB [10] и гибридном блан-

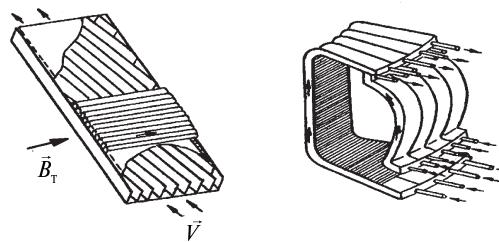


Рис. 1. Полоидально-тороидальная схема течения

кете [11]; прокачка ЖМ в данных проектах осуществляется в направлении, поперечном по отношению к основной тороидальной составляющей магнитного поля.

Основной проблемой, возникающей при создании ЖМ-бланкета, является проблема прокачки ЖМ через зоны сильного тороидального и полоидального магнитных полей. Она связана с необходимостью создания значительного перепада давления для обеспечения необходимой скорости ЖМ в каналах системы теплообмена. Это определяет, с одной стороны, необходимую мощность средств прокачки (насосов) и, с другой, — уровень давлений в системе, а следовательно, прочность и безопасность конструкции.

При любом концептуальном решении бланкета, как всякая гидравлическая система, состоит из участков труб и каналов постоянного сечения и фасонных элементов: колен и поворотов, диффузоров и конфузоров, расширений и сужений, распределительных и коллекторных устройств и др. Как известно, перепад давления Δp , необходимый на преодоление сопротивления движению в гидравлической системе, выраженный в долях скоростного напора, в общем случае равен

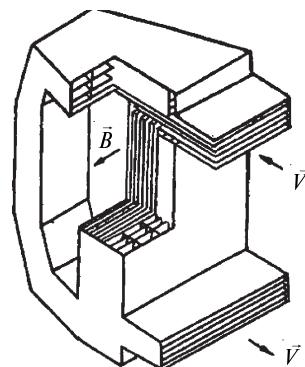


Рис. 2. Полоидальная схема течения

$$\Delta p = \frac{\rho v^2}{2} = \sum_i \lambda_i \frac{l_i}{b_i} + \sum_j \xi_i, \quad (1)$$

где v — характерная (средняя) скорость течения; ρ — плотность; b — характерный размер; l — длина канала постоянного сечения; λ — коэффициент гидравлического трения; ξ — коэффициент местного гидравлического сопротивления; i — номер участка канала с постоянным поперечным сечением; j — номер местного сопротивления.

При заданной конфигурации проточного тракта гидравлической системы задача сводится к определению коэффициентов сопротивления λ и ξ (здесь и далее индексы i и j опущены).

Перепад давления, обеспечивающий движение теплоносителя по всем элементам гидравлической системы, в случае бланкета ТЯР складывается из МГД-сопротивлений, обусловленных движением проводящей среды в магнитном поле.

В пристеночных течениях ЖМ в магнитном поле сопротивление движению определяется силами вязкого трения, электромагнитной силой и силами инерции локальной и конвективной природы. В результате движения ЖМ в магнитном поле \vec{B} индуцируются электрические токи \vec{j} , которые создают объемную тормозящую электромагнитную силу плотностью $\vec{j} \times \vec{B}$. При этом одна часть индуцированного тока замыкается через узкие (толщиной $\delta \approx M^{-1}$) сдвиговые пристеночные слои и обуславливает так называемое магнитогидродинамическое сопротивление движению. Вторая часть индуцированного тока замыкается через проводящие стенки канала, сдавая электродинамическое сопротивление движению (без формирования завихренности в потоке).

При равномерном течении в трубах в постоянном магнитном поле коэффициент сопротивления равен

$$\lambda = \frac{2M^2}{Re} \left(\frac{M}{M - th M} - \frac{1}{1 + \sigma^*} \right), \quad (2)$$

где первый член определяет магнитогидродинамическую, второй — электродинамическую части коэффициента сопротивления. Здесь Re — число Рейнольдса, M — число Гартмана, $\sigma^* = \frac{\sigma_w + t_w}{\sigma b} -$

относительная проводимость стенок канала.

В неоднородных МГД-течениях (в каналах с переменным поперечным сечением, в неоднородном магнитном поле), т. е. в гидравлической системе с местными сопротивлениями, возникают условия для замыкания индуцированных токов в продольных контурах, расположенных перед областью неоднородности поля. Это создает дополнительное сопротивление потоку, как и при течении в каналах с проводящими стенками, где токи замыкаются через стенки, и, следовательно, сопротивление пропорционально M^2/Re . Для такого гидравлического элемента сопротивление может быть определено по формуле

$$\xi = K_1 \frac{M}{Re} + K_2 \frac{M^2}{Re}. \quad (3)$$

Значения K_1 и K_2 зависят от геометрии канала, проводимости стенок и закона изменения магнитного поля.

При течениях в сильных магнитных полях, характерных для бланкета ТЯР, сопротивление течению в основном определяется электромагнитной силой, вызванной взаимодействием магнитного поля с токами, замыкающимися через проводящие стенки и продольные контуры, т. е. определяется вторым слагаемым в зависимостях (2), (3).

В сильных полях при $N \gg 1, M \gg 1$ ($N = \frac{M^2}{Re}$ — параметр МГД-взаимодействия) уравнения магнитной гидродинамики

$$N^{-1}(\vec{V}\nabla)\vec{V} = -\nabla(P/N) + M^{-2}\nabla\vec{V} + \vec{j} \times \vec{B} \quad (4)$$

могут быть линеаризованы, так как вклад конвективных членов пренебрежимо мал. Решение (4) будет определяться суперпозицией решений для течения в ядре

$$\nabla(P/N) = \vec{j} \times \vec{B}, \quad (5)$$

гидродинамика которого определяется законом Ома

$$\vec{j} = -\nabla\varphi + \vec{V} \times \vec{B} \quad (6)$$

и законами сохранения для тока и массы: $\nabla\vec{j} = 0$, $\nabla\vec{V} = 0$ (здесь φ — электрический потенциал). Уравнения (5), (6) показывают, что давление в ядре потока постоянно вдоль магнитных силовых линий; распределения других переменных также стремятся к постоянным значениям в направлении магнитного поля.



В области неоднородного течения плотность тока

$$j/(\sigma VB) \approx M^{-1/2}. \quad (7)$$

Из (5) и (7) легко получить оценку для перепада давления в неоднородных течениях в сильных магнитных полях в виде

$$\Delta p / (\rho V^2) \approx NM^{-1/2}. \quad (8)$$

Экспериментальная проверка данной зависимости была выполнена на моделях течения в прямоугольном канале с поворотом на 180° [13], в шероховатом канале [14], в коллекторной раздаче [15] и в щелевом канале [16] (рис. 3, 4).

Отметим, что непосредственная экспериментальная проверка зависимости (8) возможна только на моделях с электроизолированными стенками. При экспериментах в каналах с проводящими стенками данный эффект «шунтируется» более сильным значением $\Delta p / (\rho V^2) \approx N$, которое определяется токами, протекающими через боковую стенку.

Один из важнейших вопросов течений в сильных магнитных полях — определение границ перехода к линейному течению Стокса. Возможности точного теоретического анализа условий перехода в настоящее время крайне ограничены, что прежде всего связано со сложностью решения полной системы уравнений магнитной гидродинамики. Приближенно границы перехода могут быть определены на основе данных по перепаду давления.

Переход к линейному режиму в канале при неоднородных течениях с электроизолированными стенками происходит (по крайней мере интегрально) тогда, когда электродинамическое сопротивление существенно превышает магнитогидродинамическое сопротивление течению, т. е.

$$K_2 M^2 \text{Re} \gg K_1 M \text{Re}.$$

Тогда с учетом зависимости для коэффициента K_2 в сильных полях $K_2 \approx M^{1/2}$ имеем $M \ll CN^{2/3}$. Предполагая справедливость данной зависимости и на границе, разделяющей области линейного и нелинейного режимов течения, получим на границах кривых

$$M \approx N^{2/3}.$$

Экспериментальные данные подтверждают это соотношение (рис. 5) [17].

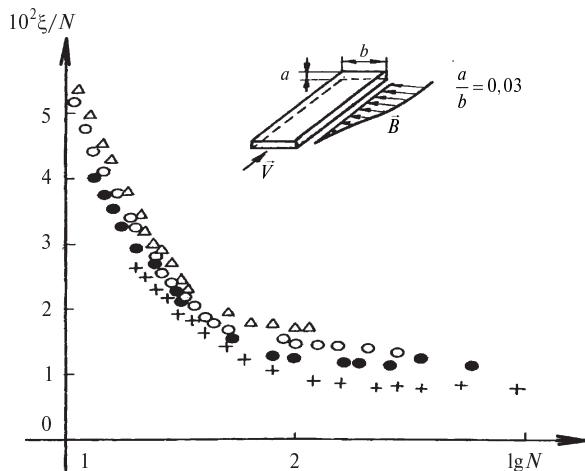


Рис. 3. Линеаризация течения в неоднородном магнитном поле в щелевидном канале:

1 — $M = 1,12 \cdot 10^3$; 2 — $1,28 \cdot 10^3$; 3 — $1,42 \cdot 10^3$; 4 — $1,74 \cdot 10^3$
(1 — ●; 2 — ○; 3 — ▲; 4 — □)

Снижение перепада давления в бланкете

Имеются три возможности уменьшить перепады давления в гидравлической системе бланкета. Первая — уменьшить электропроводность стенок, в идеале сделать их полностью непроводящими, т. е. уменьшить коэффициенты σ^* , K_1 , K_2 в (2), (3). Вторая — снизить скорость течения ЖМ в бланкете. Третья возможность — оптимизация геометрии каналов и их ориентации относительно магнитного поля.

Уменьшение относительной электропроводности стенок возможно путем нанесения элек-

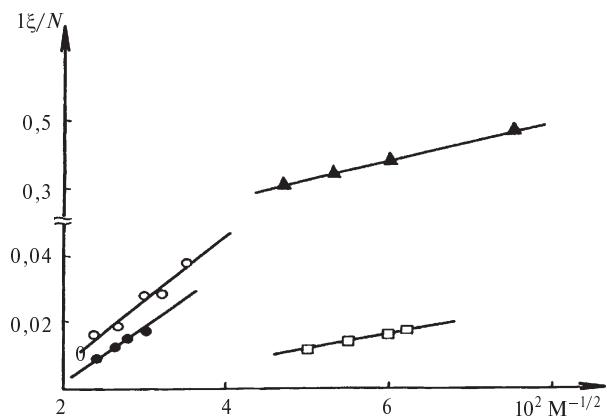


Рис. 4. Асимптотики $M^{-1/2}$ в различных течениях:

1 — неоднородное поле B_p/B_c ; 2 — неоднородное поле $B_p/B_c = 0,105$; 3 — канал повернут на 180° ; 4 — шероховатый канал
(1 — ●; 2 — ○; 3 — ▲; 4 — □)

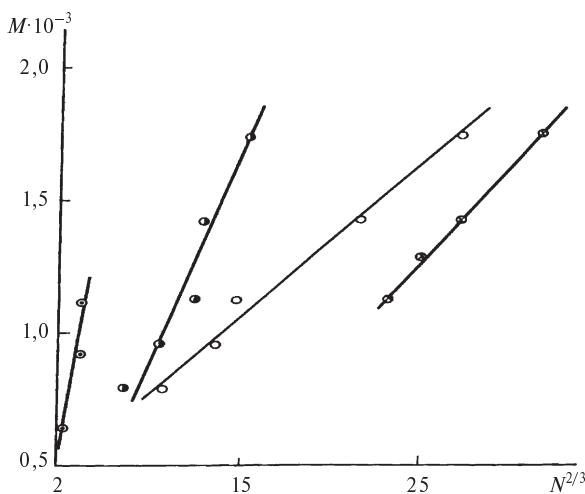


Рис. 5. Границы линейного режима течения в щелевидном канале
(⊗ — 1; ○ — 2; ● — 3; ⊖ — 4)

роизолирующих покрытий и создания самоподдерживающихся оксидных пленок на внутренней поверхности каналов либо за счет уменьшения толщины стенок путем создания слоистых стенок. Перспективы и сложности использования данных технологий достаточно подробно рассмотрены в [11, 18].

Оптимизация геометрии каналов и их ориентации в магнитном поле в настоящее время проводится двумя основными способами — использованием тороидальных каналов охлаждения первой стенки и щелевидных каналов. Целесообразность применения щелевых каналов с большим отношением сторон $\beta = b/a$ в магнитном поле, направленном вдоль длинной сто-

роны канала, определяется тем, что перепад давления обратно пропорционален размеру вдоль поля $\Delta p \approx b^{-1}$ (см (1)). Согласно численным расчетам [19] перепад давления уменьшается даже несколько быстрее, чем по зависимости $1/b$.

В проекте SCB [10] для охлаждения первой стенки предполагается использовать каналы с $\beta = 50$, а в TPSS [9] $\beta = 5$. Существенно ограничивает увеличение щелевидности каналов (увеличение β) способность стенок выдерживать высокое давление. Это ограничение особенно значимо для каналов охлаждения первой стенки и в меньшей степени существенно для каналов бридерной зоны. Способность стенок выдерживать давление обратно пропорциональна квадрату размера канала b^{-2} , т. е. при росте b уменьшается быстрее, чем перепад давления. Поэтому в каналах с большим соотношением сторон необходимо увеличивать толщину стенок, что приводит к росту скачка температуры в стенке, а в случае электропроводящих стенок и к росту Δp , либо создавать дополнительные конструкции для увеличения жесткости стенок. Так, в [10] предполагается использовать анкерные связи (рис. 6).

При максимальном давлении 0,5 МПа и толщине первой стенки $t_{FW} = 6$ мм необходимы анкерные связи $d = 15$ мм с шагом 150 мм. Введение анкерных связей приводит к появлению дополнительного МГД-сопротивления.

Теоретически дополнительный перепад давления, вызываемый введением анкерных связей, был оценен в Калифорнийском университете экспериментально [11].

Эксперименты и расчеты выполнены для канала с $a/b = 1/10$, с диаметром цилиндрической анкерной связи $d/b = 0,2$ и шагом $l/b = 1,0$. В канале с электроизолированными стенками введение анкерных связей приводит к резкому росту (в несколько раз) перепада давления (рис. 7) и в существенно меньшей степени влияет на течение в щелевом канале с проводящими стенками (рис. 8).

Согласно теоретическим и экспериментальным данным перепад давления при наличии проводящих стенок в данной геометрии возрастает в 1,6–1,8 раза по сравнению с течением без анкерных связей. Оценки показывают, что в проекте SCB [10] введение анкерных связей приведет к росту перепада давления приблизительно на 30 %.

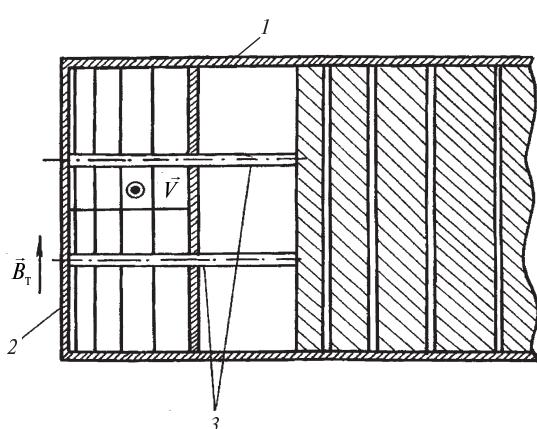


Рис. 6. Поперечное сечение щелевидного бланкета:

1 — отражатель; 2 — первая стена; 3 — анкерные связи



В местах контакта анкерных связей и первой стенки возможен локальный рост температуры. Неравномерное распределение расхода ЖМ вблизи анкерных связей будет определять неоднородное распределение температур в стенке. Данные факторы могут способствовать некоторому увеличению термомеханических напряжений.

Кроме того, как показывают эксперименты, на МГД-течение в щелевидных каналах сильное влияние оказывает угол наклона магнитного поля по отношению к большей стороне канала. Так, уже при углах наклона $\approx 6^\circ$, характерных для бланкета ($B_t / B_c = 0,1$), резко возрастают потери давления как в равномерном (рис. 9), так и в неравномерном магнитном поле при течении в канале с непроводящими стенками.

В каналах с проводящими стенками малый угол наклона магнитного поля практически не влияет на гидравлику равномерного течения и приводит к небольшому росту перепада давления в областях неравномерного течения, например в области расположения анкерных связей.

Существенным моментом при выборе геометрии каналов бланкета является вопрос о снижении перепада давления в местных МГД-сопротивлениях, таких, как течение в неравномерном магнитном поле (вход и выход из бланкета), в поворотах, коллекторной раздаче и др. Так, течение на участках поворота может оказаться критичным для перспективной концепции тороидального-полоидального бланкета. Перепады

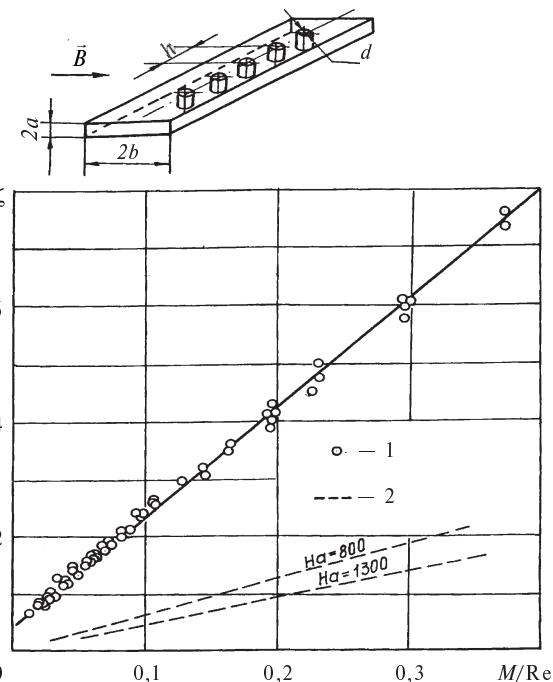


Рис. 7. Гидравлическое сопротивление канала с анкерными связями и непроводящими стенками:

1 — $M = 600-1400$; 2 — без анкерных связей

давления в местных сопротивлениях сравнимы и даже могут превосходить Δp в основных каналах; так, в бланкете отношения перепадов давления в местных сопротивлениях Δp_M к перепаду давления в основных каналах составляет 0,32 для NET [8], 0,34 для SCB [10].

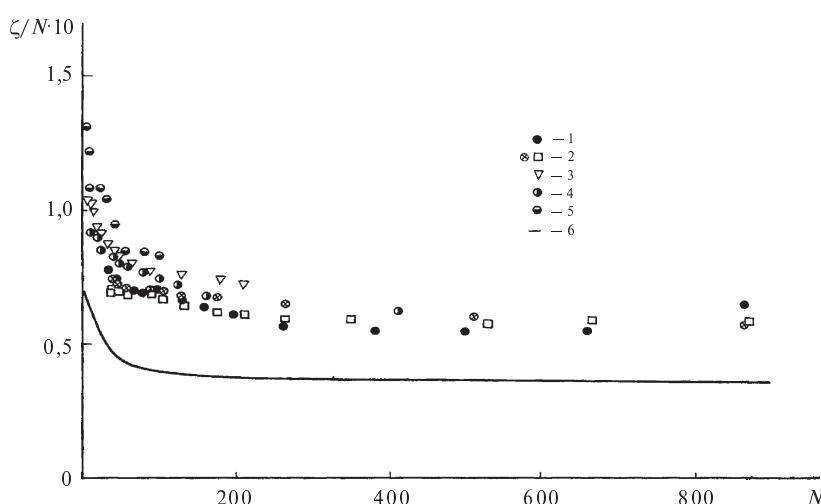


Рис. 8. Гидравлическое сопротивление канала с тонкими проводящими стенками и анкерными связями:

1 — $M = 1230$; 2 — $M = 1401$; 3 — $M = 703$; 4 — $M = 974$; 5 — $M = 559$;
6 — без анкерных связей

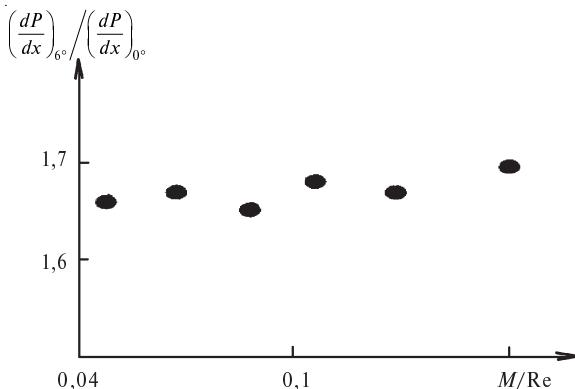


Рис. 9. Влияние угла наклона поля на градиент давления в щелевидном канале ($M = 1,74 \cdot 10^3$)

В настоящее время объем теоретических и особенно экспериментальных данных по неравномерным МГД-течениям сравнительно невелик, поэтому можно сделать только общие замечания относительно способов снижения потерь давления в неоднородных областях: это уменьшение размеров каналов в направлении, перпендикулярном полю, поскольку $\Delta p \approx a$.

При ламинарном течении гидравлические потери пропорциональны скорости течения, поэтому одним из способов снижения уровня давления в бланкете является уменьшение скорости течения теплоносителя. Однако реальные возможности уменьшения скорости течения в бланкете крайне ограничены.

Расход жидкого металла в бланкете определяется из баланса мощности

$$\rho C \Delta T Q = W_t,$$

где ΔT — нагрев металла в бланкете; Q — расход теплоносителя; W_t — выделяемая мощность; ρ и C — плотность и теплоемкость теплоносителя. При одинаковых геометрии, мощности энерговыделения, распределении скоростей, относительной электропроводности перепад давления и затраты мощности на прокачку $N \Delta p$ определяются физическими свойствами теплоносителя и нагревом. Ламинарному течению в канале с электропроводящими стенками соответствуют выражения

$$\Delta P \approx \frac{M^2}{Re} \rho V^2 \approx \frac{\sigma}{\rho C \Delta T};$$

$$N_p \approx \Delta p Q \approx \frac{\sigma}{\rho^2 C^2 \Delta T^2}.$$

Таким образом, для уменьшения мощности на прокачку и давления в бланкете необходимо выбирать теплоноситель, обладающий наибольшей теплоаккумулирующей способностью (наибольшее ρC) и наименьшей электропроводностью. Но выбор жидкостных теплоносителей ограничен. Поэтому единственным способом снижения скорости течения ЖМ в бланкете является увеличение нагрева теплоносителя.

Нагрев ЖМ в бланкете ограничен прежде всего коррозионной стойкостью и максимально допустимыми температурами конструкционных материалов, причем наиболее существенные данные ограничения для первой стенки. Если в качестве конструкционного материала использовать сплавы ванадия, то максимально допустимая температура — 750 °C. Допустимый (по термомеханическим напряжениям) температурный перепад в первой стенке составляет $\Delta T_{AC} \approx 100$ °C (при $t_{AC} \approx 6$ мм). Следовательно, максимально допустимая температура на границе «жидкий металл — первая стенка» ограничена $T_k \approx 650$ °C, и поэтому максимально возможный нагрев ЖМ теплоносителя при использовании сплавов ванадия в качестве конструкционного материала составляет $\Delta T_{max} = 650 - T_{bx}$, где $T_{bx} \approx 200 - 300$ °C. Реальный нагрев теплоносителя меньше, так как среднерасходная температура $\bar{T} < T_k$. Для уменьшения $\Delta T = T_k - \bar{T}$ необходимо принимать специальные меры для выравнивания профиля температур в канале первой стенки и интенсификации теплосъема.

Для повышения термического КПД необходимо, чтобы разность температур на входе и выходе бланкета была одинакова во всех каналах. Для этого при существенно неоднородном энерговыделении по ширине бланкета необходимо организовать течение с распределением расхода по каналам, близким к закону энерговыделения (рис. 10).

Обеспечение требуемого распределения расхода по каналам может быть достигнуто либо с помощью дросселирующих устройств, либо путем соответствующего подбора гидравлического сопротивления каналов (например, путем подбора соответствующих размеров, толщин электропроводных стенок). Недостатком первого способа являются большие потери энергии на дросселирующих устройствах, второго — невозможность регулирования расхода при возникновении аварийных ситуаций.



Существенным ограничением на нагрев ЖМ в бланкете является коррозионная стойкость конструкционного материала: скорость коррозии быстро возрастает при увеличении температуры [19]. Высокая скорость коррозии может привести к необходимости снижения T_k и, соответственно, к росту Δp и N_n . В настоящее время объем данных по скорости коррозии ванадия и стали в Li, Li₁₇ и Pb₈₃ при высоких температурах недостаточен, чтобы сделать окончательный вывод о максимально допустимой T_k ; кроме того, практически не исследовано влияние профиля скорости на коррозию (большие пристеночные градиенты скорости при течении в магнитном поле могут способствовать ускоренной коррозии).

Вопросы теплообмена в бланкете. Процессы теплообмена при течении ЖМ в бланкете приобретают особую значимость при анализе термохимических напряжений, термического цикла, аварийных ситуаций.

Термохимические напряжения в стенках конструктивных элементов (прежде всего в первой стенке) определяются распределением температур, в первую очередь скачком температур в стенке, который зависит от величины теплового потока и термического сопротивления стенки R_t ($\Delta T_{AC} \approx$

$$\approx qR$$
). Для слоистых стенок $R_t = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_i \frac{t_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}$,

где α_1, α_2 — коэффициенты теплоотдачи поверхностей стенки; t_i, λ_i — толщина и теплопроводность слоев стенки. При заданных геометрии и материалах стенки скачок температуры определяется эффективностью теплосъема с поверхности.

При числах Пекле $Re \approx 10^2$, характерных для течения в бланкете, существенный вклад в теплообмен вносит молекулярный перенос тепла, однако только механизм теплопроводности не может обеспечить эффективный теплосъем с первой стенки и равномерный нагрев металла в бланкете. Сильное магнитное поле реактора, подавляя турбулентность, снижает эффективность теплосъема (уменьшает α), поэтому для уменьшения скачка температур и повышения равномерности профиля температур в каналах необходимо принимать дополнительные меры по интенсификации конвективного теплообмена.

Повышение эффективности теплосъема в бланкете может быть достигнуто: созданием высокоскоростных струй у стенок каналов; орга-

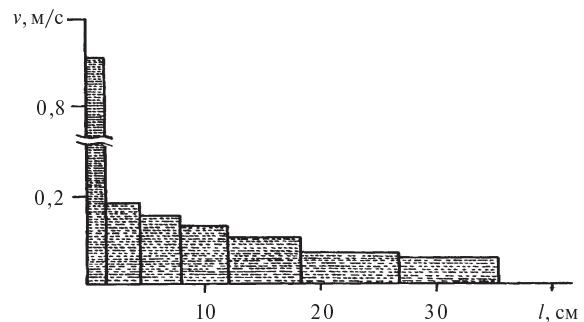


Рис. 10. Распределение расхода в бланкете (l — расстояние от первой стенки, см)

низацией скоростных структур, имеющих нормальную к стенке компоненту; дестабилизацией течения в пристеночных областях.

Управление профилем скорости в пристеночной области в магнитном поле может осуществляться путем вариации электропроводности стенок каналов, изменения поперечного сечения. Профиль скорости зависит в основном от электропроводности стенок, нормальных магнитному полю (σ_1^*), поэтому управление теплообменом и профилем теплообмена возможно путем выбора закона изменения электропроводности σ_1^* , обеспечивающего неоднородное распределение скорости с большими скоростями у первой стенки.

Вариация поперечного сечения канала также позволяет получить неравномерное распределение скорости по сечению канала. Для интенсификации теплообмена у первой стенки в [20, 21] предложено использовать каналы в виде системы последовательных расширений и поджатий с различными проводимостями стенок, что позволяет получить высокоскоростные струи у первой стенки; кроме того, при течении в таком канале нормальная компонента скорости отлична от нуля. Существенное влияние на теплообмен оказывает также соотношение сторон канала. Так, использование щелевых каналов может приводить к росту максимальной температуры стенки и снижению ее средней температуры, т. е. увеличение отношения сторон приводит к росту механических напряжений.

Поэтому конструкция бланкета должна выбираться на основе оптимальных параметров гидравлики, теплообмена и коррозии. Целесообразно проведение прежде всего термогидравлических исследований элементов жидкотемпературного бланкета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Муравьёв, Е.В.** Вопросы атомной науки и техники [Текст] / Е.В. Муравьёв // Термоядерный синтез.— 1980. Вып. 2.6.— С. 757.
2. **Gasini, G.** Liquid metal engineering and technology [Текст] / G. Gasini // Proc. 3-d. Internat. Conf.— Oxford.— 9–13 april 1984.— Vol. 3.— P. 303–315.
3. **Gordon, J.D.** Liquid metal engineering and technology [Текст] / J.D. Gordon, J.K. Garnen, N.J. Hof-fman // Proc. 3-d. internat. Conf.— Oxford.— 9–13 April 1984.— Vol. 1.— P. 303–315.
4. **Michael, I.** Kernf or schungszentrum [Текст] / I. Michael.— Karlsruhe GmbH.— KfK 3839.— 1984.
5. **Глухих, В.А.** Физико-технические основы управляемого термоядерного синтеза [Текст] / В.А. Глухих, В.А. Беляев, А.Б. Минеев.— СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2006.— 255 с.
6. **Smith D.L.** / D.L. Smith [et al.].— Argone National Laboratory Report. ANL/FPP -84-1.— 1984.
7. **Meldivanov, A.I.** / A.I. Meldivanov [et al.].— USSR-US Exchange.— 1989.
8. **Malang S.** / S. Malang // Fusion Technology.— 1988. № 14.— P. 1343.
9. **Picologlou, B.F.** / B.F. Picologlou, Y.S. Cha, S. Makumdar // Fusion Technology.— 1986.
10. **Lavrentev, I.V.** / I.V. Lavrentev, S.I. Sidorenkov, A.V. Saltykowsky.— ITER working material.— Garching.— 1989.
11. **Muravev E.V.** / E.V. Muravev [et al.].— USSR-US Exchange.— 1989.
12. **Глухих, В.А.** Магнитная гидродинамика в ядерной энергетике [Текст] / В.А. Глухих, А.В. Та-наева, И.Р. Кириллов.— М.: Энергоатомиздат, 1987.— 262 с.
13. **Аитов, Т.Н.** / Т.Н. Аитов, А.В. Тананаев, В.В. Яковлев // Изв. АН СССР.— МЖГ.— 1985, № 5. С. 159–163.
14. **A.V. Tananaev** / A.V. Tananaev [et al.].— Liquid Metal Magnetohydrodynamics.— Kluwer Academic Publishers.— 1989.— P. 55–61.
15. **Тананаев, А.В.** / А.В. Тананаев [и др.] // 12 Труды рижского совещания по магнитной гидро-динамике.— 1987.— Т. 1.— С. 159.
16. **Тананаев, А.В.** / А.В. Тананаев [и др.] // Труды рижского 12совещания по магнитной гидро-динамике.— 1990.— Т. 1.— С. 15.
17. **Тананаев, А.В.** / А.В. Тананаев [и др.] // Магнитная гидродинамика.— 1991.— № 2. С. 58.
18. **Barleon, L.** / L. Barleon [et al.] // Liquid Metal Magnetohydrodynamics.— Kluwer Academic Publishers. 1989.— P. 55–61.
19. **Ying, A.Y.** / A.Y. Ying, M.S. Tillack // UCLA-FNT-42. 1990.
20. **Walker, J.S.** / J.S. Walker, B.F. Picologlou. Fusion Technology 1986. № 10 (3).— P. 866.
21. **Picologlou, B.F.** / B.F. Picologlou, C.B. Reed, T.O. Hua // Proc 4th. Internat. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics.— Karlsruhe. Germany.— 1989.

УДК 532.593

Н.В. Петров

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ВОДЕ ВБЛИЗИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Целью работы было численное исследование локального энерговыделения в жидкости вблизи свободной поверхности, а также создание инструмента моделирования распространения волн в жидкости и газе и их взаимодействия с деформируемой межфазной границей. Существует множество технологий, которые используют процессы, происходящие при взрыве в жидкостях, в том числе вблизи свободной поверхности. Исследование явлений, сопровождающих подводный взрыв, необходимо также для развития механики жидкости и газа, в частности механики гетерогенных сред.

Один из ключевых вопросов при моделировании подводного взрыва — определение положения межфазной границы. Существует несколько подходов к решению этой задачи. Наибольшую популярность при решении задач о течении со свободной поверхностью получил метод Volume of fluid (VOF), в котором используется распределение объемной доли жидкости в ячейках расчетной сетки [1]. Эта величина играет роль маркера, отслеживающего движение жидкости. Положение межфазной границы определяется, например, как изоповерхность среднего значения объемной доли. В рамках это-



го метода с использованием небольших вычислительных ресурсов можно рассчитывать сложные течения. Однако в случае сжимаемости обеих фаз появляется неоднозначность при определении плотности среды.

В предлагаемой статье рассмотрен алгоритм, позволяющий на основе VOF метода описывать положение границы двух сжимаемых фаз.

Рассматривается область, заполненная газом и сжимаемой жидкостью, между которыми проходит межфазная граница. Течение среды описывается нестационарными уравнениями Эйлера. В двумерной постановке они могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} &= -f; \\ z = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \end{pmatrix}; \quad F_x = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \end{pmatrix}; \\ F_y = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \end{pmatrix}; \\ f = \begin{pmatrix} i \rho v / x \\ i \rho u^2 / x + \Sigma_x \\ i \rho uv / x + \Sigma_y \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь ρ , p — плотность и давление среды; u , v — компоненты вектора скорости; Σ — сила поверхностного натяжения. Значение $i = 1$ определяет наличие осевой симметрии ($i = 0$ для плоской задачи).

Для определения местоположения межфазной границы к системе (1) добавляется уравнение переноса скалярной величины α , которая имеет смысл объемной доли жидкости. Это уравнение в случае сжимаемой среды можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial \rho_l \alpha}{\partial t} + \frac{\partial \rho_l \alpha u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_l \alpha v}{\partial y} = -i \frac{\rho_l \alpha u}{x}. \quad (2)$$

Здесь индекс l подчеркивает тот факт, что уравнение (2) записано относительно жидкой фазы.

Сила поверхностного натяжения в уравнении (1) является объемной силой, которая в терми-

нах объемной доли жидкости может быть представлена в виде [1]

$$\Sigma = \sigma k n; \quad n = \frac{\text{grad } \alpha}{|\text{grad } \alpha|}; \quad k = \text{div}(\text{grad } \alpha). \quad (3)$$

Система уравнений (1) незамкнута. Для ее замыкания необходимо использовать уравнение состояния среды. Для описания состояния жидкости (вода) используется уравнение Тейта [2], которое имеет вид

$$p = p_a K \left[\left(\frac{\rho}{\rho_a} \right)^\beta - 1 \right] + p_a, \quad (4)$$

где $K = 3045$, $\beta = 3045$, $p_a = 101325$ Па, $\rho_a = 996,5$ кг/м³.

Здесь приводится баротропная форма уравнения Тейта. Следует обосновать пренебрежение влиянием температуры. Рассмотрим распространение плоской ударной волны в воде. При перепаде давления на ее фронте $\Delta p_{fr} = 1000$ МПа температура меняется примерно на $\Delta T \approx 6$ К. При этом в диапазоне температур 20–60 °C параметры уравнения состояния Тейта K , β изменяются соответственно на 1 и 3 %. Эти оценки показывают, что изменение температуры в рассматриваемом диапазоне слабо влияет на параметры воды.

Кроме уравнения Тейта для описания состояния жидкости применяется модель «Stiffened gas» [3]. При этом для жидкости используется уравнение состояния газа, параметры которого подбираются так, чтобы в заданном диапазоне давлений выполнялось уравнение Тейта. В рамках модели «Stiffened gas» обе фазы описываются единым уравнением состояния и отличаются только набором параметров. Такой подход оказывается удобным вблизи межфазной границы. Ниже представлены адиабата Пуассона и адиабата Гюгонио, построенные по модели «Stiffened gas»:

$$\frac{p - p_\infty}{\rho^N} = \text{const}; \quad (5)$$

$$R = \frac{(N+1)(P + p_\infty) + (N-1)(p + p_\infty)}{(N+1)(p + p_\infty) + (N-1)(P + p_\infty)}. \quad (6)$$

Здесь параметры имеют следующие значения: $p_\infty = 492,115$ МПа, $N = 4,9$ для воды и $p_\infty = 0$, $N = 1,4$ для газа.



Для решения системы уравнений (1) был выбран численный метод, представляющий собой явную схему высокого разрешения типа предиктор-корректор [4]. Эта схема является модификацией схемы Годунова; она предложена Родионовым [5] и позволяет рассчитывать сквозным образом течения жидкости и газа с разрывами, обеспечивая высокую точность и монотонность решения. Схема обладает вторым порядком аппроксимации на гладких решениях.

Ключевой компонент этого алгоритма — решение задачи Римана на каждой грани расчетной ячейки. По аналогии с оригинальным алгоритмом [4] оно было построено для уравнения Тейта в случае жидкости и модели «Stiffened gas» для решения задачи на межфазной границе. В обоих случаях это — итерационное решение, время сходимости которого определяет, главным образом, время работы алгоритма. Следует заметить, что введение двух разных моделей для описания состояния жидкости связано с тем, что при использовании уравнения Тейта задача Римана сходится за меньшее число итераций по сравнению с аналогичным решением по модели «Stiffened gas».

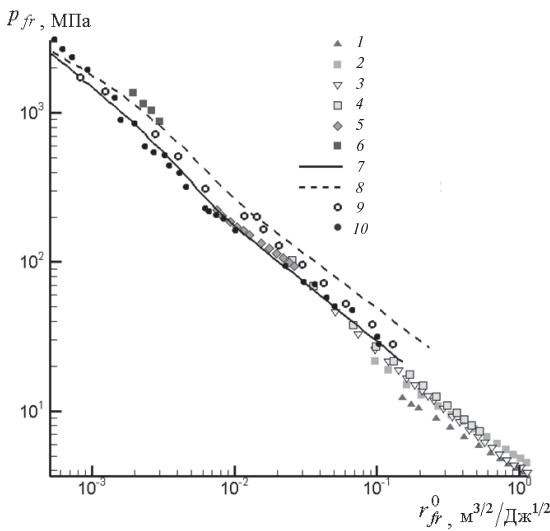


Рис. 1. Перепад давления p_{fr} на фронте цилиндрической волны сжатия в зависимости от приведенного радиуса $r_{fr}^0 = r_{fr}/\sqrt{kq}$ (r_{fr} — радиус цилиндрической волны; q — энергия взрыва, $k = 4,19 \cdot 10^3$): 1–6 — численный расчет при различных энергиях взрыва и размерах области энерговыделения; 7–8 — расчетные данные [7]

Для определения местоположения границы раздела двух фаз независимо от системы (1) решалось уравнение для объемной доли жидкости α (2). Это уравнение решается во всей расчетной области относительно жидкости. Для этого параметры жидкости экстраполируются в область, заполненную газом. На практике экстраполированные величины используются лишь в нескольких слоях ячеек вблизи межфазной границы.

Основной недостаток VOF метода — размытие границы за счет сеточной вязкости. Она появляется при использовании противопоточной аппроксимации для определения значений на грани расчетной ячейки. С другой стороны, использование схемы с аппроксимацией вниз по потоку приводит к «обострению» градиентов, однако данная схема неустойчива и приводит к увеличению локальных максимумов и уменьшению локальных минимумов, т. е. не обеспечивает ограниченности решения. В оригинальном методе VOF, предложенном Хиртом и Николсом [1], использовалась схема с аппроксимацией вверх и вниз по потоку с различными весами. В представленной работе для получения значения на гранях расчетной ячейки используется функция-ограничитель Ван Лира [6]. Она обеспечивает монотонность решения и обладает сжимающими свойствами, позволяющими повысить степень разрешения контактных разрывов.

Предполагалось, что взрыв инициируется локальным повышением давления. При этом энергия взрыва выделяется мгновенно и полностью переходит во внутреннюю энергию жидкости в заданной области. Для проверки такой постановки было проведено сравнение с расчетными и экспериментальными данными других авторов (рис. 1).

С помощью разработанного алгоритма было исследовано распространение волн сжатия и разрежения, инициированных подводным взрывом вблизи свободной поверхности. Проведено качественное сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными, опубликованными Н. Kleine и др. [8]. В этой работе рассматривался взрыв 10 мг азота серебра AgN_3 (выделяющаяся при этом энергия равна примерно 20,5 Дж), заряд был нанесен тонким слоем на сферу диаметром 1 см (рис. 2).

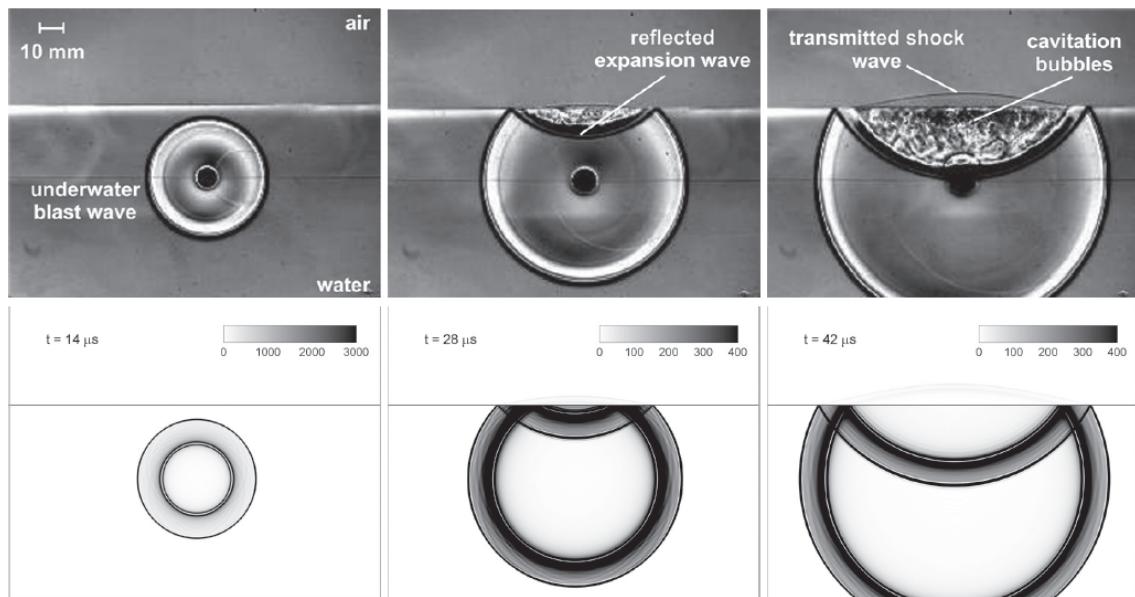


Рис. 2. Структура течения, инициированного подводным взрывом вблизи поверхности (через 14, 28 и 42 мкс после взрыва):

верхний ряд — шлирен-фотографии, опубликованные H.Kliene [8];
нижний ряд — результаты численного моделирования (градиент плотности).

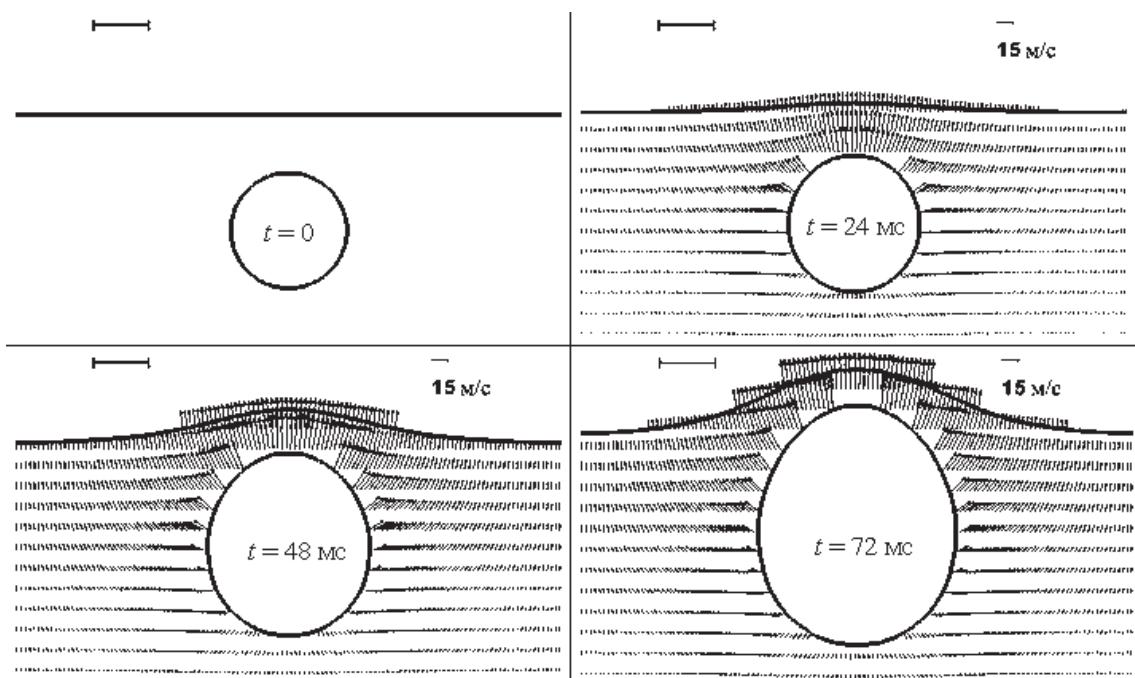


Рис. 3. Эволюция межфазной границы и вектора скорости



Сразу после взрыва к центру начинает распространяться волна разрежения, которая фокусируется по мере движения. Образуется зона пониженного давления, в которую устремляется поток жидкости, при этом восстанавливается первоначальное давление. Одновременно с волной разрежения начинает распространяться волна сжатия, интенсивность которой падает по мере удаления от центра. Именно такая картина и наблюдается через 14 мкс после момента взрыва.

После взаимодействия со свободной поверхностью волна сжатия проходит в газ в виде слабого акустического возмущения и отражается обратно в воду в виде волны разрежения, в которой может начаться кавитация. В работе [8] отмечается, что кавитация появляется уже через 2 мкс после взаимодействия взрывной волны со свободной поверхностью. На данном этапе исследований кавитация в расчетах не учитывалась.

На рис. 3 показана эволюция межфазной поверхности. В начальный момент времени в центре области вблизи свободной поверхности находится газовый пузырь с давлением 10 атм. С началом отсчета времени в жидкость начинает распространяться волна сжатия, в газ уходит волна разрежения. Со временем в узкой обла-

сти между пузырем и поверхностью скорость жидкости существенно возрастает, что приводит к заметной деформации межфазной границы. Рост скорости в этой области происходит из-за многочисленных переотражений волн, спутный поток которых всегда направлен вверх.

Таким образом, сформулирована модель, позволяющая описывать течение, инициированное подводным взрывом вблизи свободной поверхности. Реализован численный метод, использующий решение задачи о распаде разрыва в воде, газе и на деформируемой границе двух сред. Представлено качественное сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными по сферическому взрыву малой мощности вблизи свободной поверхности. По результатам численного эксперимента детально проанализирована структура течения, сопровождающего подводный взрыв вблизи поверхности. Показано, что сформулированный алгоритм моделирования позволяет адекватно описывать процессы, сопровождающие подводный взрыв вблизи поверхности. Дальнейшее развитие этой работы будет связано с учетом процессов межфазного переноса массы.

Эта работа была поддержана Государственным контрактом № 02.740.11.0201

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hirt, C.W. Volume of fluid (VOF). Method for the dynamics of free boundaries [Text] / C.W.Hirt, B.D.Nichols// Journal of computational physics.— 1981. Vol. 39.— P. 201–226.
2. Ridah, S. Shock waves in water [Text] / S. Ridah // J.Appl.Phys.— 1988. Vol 64.— Is. 1.— P. 159–185.
3. Harlow, F. Fluid dynamics [Text] / F.Harlow, A.Amsden // LANL Monograph LA-4700.— 1971.
4. Годунов, С.К. Численное решение много-мерных задач газовой динамики [Текст] / С.К. Годунов, А.В.Забродин, М.Я.Иванов, А.Н.Крайко, Г.П.Прокопов.— М.: Наука, 1976.
5. Родионов, А.В. Повышение порядка аппроксимации схемы С.К.Годунова [Текст] / А.В Родионов // ЖВМиМФ.— 1987. Том. 27. № 3.— С. 1853–1859.
6. Van Leer, B. Towards the ultimate conserva-
tive difference scheme. IV. A new approach to numerical convection [Text]/ B. Van Leer // Journal of Computational Physics.— 1977. Vol. 23. Is. 3.— P. 276–299.
7. Кедринский, В.К. Гидродинамика взрыва [Текст] / В.К. Кедринский.— Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, 2000.
8. Христофоров, Б.Д. Параметры ударной волны при подводном взрыве шнурового заряда [Текст] / Б.Д. Христофоров., Э.А. Широкова // ПМТФ,— 1962. № 5.— С. 147–149.
9. Коул, Р. Подводные взрывы [Текст] / Р. Коул— М.: Изд-во иностр. лит., серия «Механика», 1950.
10. Kleine, H. Cavitation induced by low-speed underwater impact [Text] / H. Kleine, S. Terper, K. Takehara, T.G. Etoh, K. Hiraki // Shock Waves. Springer Berlin Heidelberg.— 2009.— P. 895–900.



УДК 621.1

А.Г. Батухтин, П.Г. Сафонов, М.В. Кириллов

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА ХОЛОДНОГО ВОЗДУХА ПЕРЕД ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯМИ КОТЛОВ (на примере Харанорской ГРЭС)

С выходом федерального закона ФЗ-261 «Об энергосбережении, повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» очень остро встал вопрос экономии энергоресурсов. Инвестиционная политика энергетических компаний при ограниченности финансовых инструментов не позволяет им производить энергию эффективно. Для нашей страны характерна разработка малозатратных способов повышения эффективности производства продукции [1–3]. Большое влияние на эффективное производство электроэнергии на ТЭС оказывают собственные нужды котла и турбины. Одной из составляющих собственных нужд станции является подогрев холодного воздуха перед подогревателями котлов.

Подогрев воздуха перед воздухоподогревателем котла на тепловых электростанциях при сжигании твердого топлива и мазута играет огромную роль как с точки зрения экономичности, так и с точки зрения надежности работы котлоагрегата. С одной стороны, снижение температуры воздуха на входе в котел снижает потери теплоты с уходящими газами, с другой стороны, это вызывает низкотемпературную коррозию поверхностей нагрева в результате образования капелек серной кислоты при конденсации водяных паров в уходящих газах.

Существует множество методов предупреждения низкотемпературной коррозии, к основным из которых относятся [4]: удаление серы из топлива; введение присадок в топочные газы; изготовление поверхностей нагрева из материалов, хорошо сопротивляющихся коррозии; повышение температуры металла выше точки росы и др.

В условиях устаревшего оборудования и недостаточного финансирования главное внимание

уделяется методу повышения температуры металла выше точки росы, что достигается предварительным подогревом холодного воздуха перед воздухоподогревателем. В связи с этим для каждого вида топлива определяется минимально допустимая температура воздуха на входе в воздухоподогреватель исходя из температуры точки росы в дымовых газах.

В условиях пониженных температур предварительный подогрев воздуха до необходимой температуры перед воздухоподогревателем достигается в основном либо рециркуляцией горячего воздуха, либо подогревом воздуха в паровых калориферах. Как показали опыты, предварительный подогрев холодного воздуха в калориферах котла на каждые 10 °C снижает КПД брутто котла на 0,15 %, а тепловой КПД нетто, вычисленный с учетом расхода тепла на паровой подогрев, — на 0,55 % [5].

Рассмотрим схему предварительного подогрева холодного воздуха на котлах ЕП-670-13,8-545 БТ (ТПЕ-216), установленных на Харанорской ГРЭС (рис. 1).

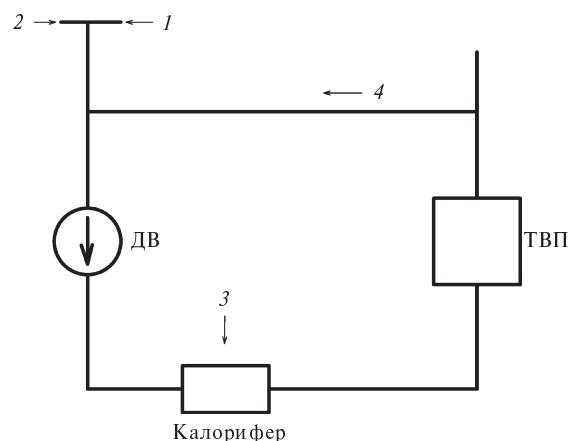


Рис. 1. Схема предварительного подогрева холодного воздуха



Забор холодного воздуха производится зимой с улицы 2, летом с цеха 1. Далее по тракту до дутьевого вентилятора ДВ смонтирован трубопровод внутренней рециркуляции диаметром 800 мм для присадки горячего воздуха после трубчатого воздухоподогревателя ТВП с температурой 300 °C. В период низких температур, когда не хватает тепла горячего воздуха для поддержания необходимой температуры перед ТВП (50 °C для установленных котлов, работающих на бурых углях Харанорского и Уртуйского месторождений марки Б2), в работу вводятся калориферы котла, использующие в качестве теплоносителя пар из второго отбора турбины 3, имеющего следующие параметры: давление 2,5 МПа и температуру 330 °C.

Использование калориферов котла в схеме предварительного подогрева холодного воздуха негативно сказывается на экономичности работы энергоблока. Это связано с тем, что теплота уходящих газов, бесполезно теряющаяся в атмосфере, замещается высокопотенциальным паром, который может использоваться в более рациональных целях.

В связи с этим в результате систематизации данных внутренних исследований и испытаний был предложен ряд технических решений для обеспечения более экономичной работы энергоблока.

Расчет показателей работы котлоагрегата при использовании выбранных технических решений показан в табл. 1. Поясним:

Таблица 1

Сравнительный анализ технических решений

Параметр	Ед. изм.	Значения параметров в пяти схемах				
		1	2	3	4	5
Электрическая нагрузка блока	МВт	215	215	215	215	215
Температура воздуха в месте забора	°C	-17,4	30	-17,4	-20	50
Температура воздуха после рециркуляции	°C	20	50	50	18	50
Температура горячего воздуха после ТВП	°C	295	295	295	295	295
Расход горячего воздуха на котел	тыс. м ³ /ч	580	580	580	580	580
Расход горячего воздуха на рециркуляцию	тыс. м ³ /ч	77,5	46,6	156,6	78,2	0,0
Доля рециркуляции	%	11,8	7,4	21,3	11,9	0,0
Изменение доли рециркуляции	%	0	-4,3	9,5	0,1	-11,8
Нагрузка ДВ по воздуху	тыс. м ³ /ч	657,5	626,6	736,6	658,2	580,0
Электрическая нагрузка ДВ	МВт	1,207	1,196	1,235	1,207	1,180
Изменение нагрузки на ДВ	МВт	0	-0,011	0,028	0,000	-0,027
Температура уходящих газов	0C	165,0	176,7	139,5	164,8	196,7
Изменение температуры уходящих газов	0C	0	11,7	-25,5	-0,2	31,7
Влажность угля на рабочую массу, W_p	%	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2
Зольность угля на рабочую массу, A_p	%	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
Теплота сгорания угля, Q_{ph}	МДж/кг	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2
Приведенная влажность, W_n	-	10,86	10,86	10,86	10,86	10,86
Коэффициент k	-	3,69	3,69	3,69	3,69	3,69
Коэффициент c	-	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Коэффициент b	-	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Потери тепла с уходящими газами, q_2	%	11,03	9,34	9,44	11,15	9,57
Изменение потерь тепла с уходящими газами, Δq_2	%	0	1,69	1,59	-0,12	1,46
КПД котла брутто	%	90	91,69	91,59	89,88	91,46
Тепло с непрерывной продувкой котла	ГДж/ч	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8
Затраты тепла на собственные нужды котла	%	2,9	1,4	1,4	3,1	1,4
КПД котла нетто	%	83,18	86,06	85,97	82,95	85,84
Изменение КПД котла	%	0	2,87	2,78	-0,23	2,66



схема 1 — действующая схема с частичной рециркуляцией горячего воздуха и забором холодного воздуха с улицы;

схема 2 — схема с частичной рециркуляцией горячего воздуха и забором холодного воздуха из цеха круглый год;

схема 3 — схема с полной рециркуляцией горячего воздуха (при условии увеличения диаметра трубопровода рециркуляции) и забором холодного воздуха с улицы;

схема 4 — схема с частичной рециркуляцией горячего воздуха и забором холодного воздуха с улицы при увеличении высоты забора холодного воздуха;

схема 5 — схема без рециркуляции горячего воздуха и забором холодного воздуха из цеха при увеличении высоты забора холодного воздуха.

Отметим, что схемы 2 и 5 возможны при восстановлении приточной вентиляции главного корпуса.

Изменение температуры уходящих газов (рис. 2) определялось опытным путем исходя из расхода воздуха через ТВП при постоянном расходе топлива.

Как видно из анализа технических решений, наиболее перспективны схемы 2 и 3. Однако для обеспечения работы по схеме 2 необходимо восстановление приточной вентиляции котельного отделения главного корпуса, так как есть вероятность понижения температуры внутри главно-

го корпуса до отрицательных величин и, как следствие, пермерзания труб и ухудшения рабочего микроклимата.

При работе по схеме 3 существуют два решения: увеличение диаметра трубопровода рециркуляции (как указывалось выше) и установка органа, регулирующего степень открытия/закрытия шибера «зима—лето», что определяет забор воздуха с улицы или из цеха.

Одним из таких регулирующих механизмов является механизм электрический однооборотный (МЭО). Он устанавливается на площадке обслуживания шибера «зима—лето», электрифицируется и управляет дистанционно с рабочего места машиниста энергоблока. Управляя положением шибера можно регулировать температуру холодного воздуха до рециркуляции.

Стоимость МЭО с монтажом и электрификацией по предварительным расчетам оценивается в 300 тыс. руб., что считается незначительным капиталовложением по сравнению с экономическим эффектом.

Как видно из рис. 2, при увеличении расхода воздуха через ТВП снижаются температура уходящих газов и, как следствие, теплопотери с ними, а КПД котла повышается. Соответственно лучшим режимным фактором будет поддержание максимальной рециркуляции горячего воздуха. Дальнейшее доведение температуры холодного воздуха перед ТВП до необходимой (50°C) воз-

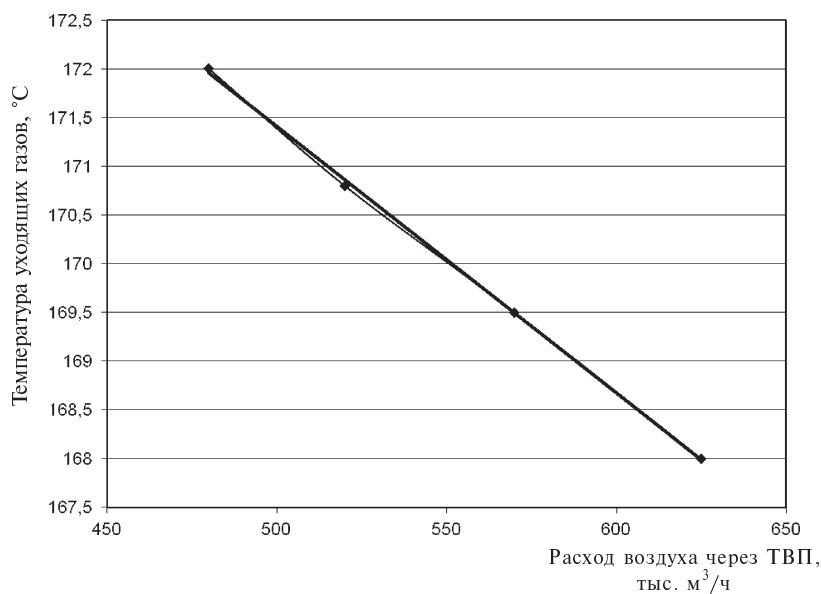


Рис. 2. Зависимость температуры уходящих газов от расхода воздуха через ТВП

можно смешением воздуха с улицы и из цеха за счет управления степенью открытия шибера «зима—лето».

Учитывая, что схема 3 значительно снижает температуру уходящих газов, необходимо знать температуру точки росы для данного вида топлива. Расчет температуры точки росы выполнен по [6] и показан в табл. 2.

Для обеспечения надежной работы воздухо-подогревателя необходимо, чтобы температура стенки поверхности нагрева была выше температуры точки росы на 10 °C [7]. А поскольку коэффициенты теплоотдачи воздуха и дымовых газов приблизительно равны, то температура стенки со стороны дымовых газов будет стремиться к температуре самих дымовых газов. В итоге получим минимально допустимую температуру уходящих газов на выходе из ТВП:

$T_{yx} = t_p + 10 = 101,7 + 10 = 111,7^{\circ}\text{C}$ — при сжигании угля Харанорского месторождения;

$T_{yx} = t_p + 10 = 95,1 + 10 = 105,1^{\circ}\text{C}$ — при сжигании угля Уртуйского месторождения.

Таким образом, применяя схему 3 с установкой регулирующего органа на шибере «зима—лето», можно отказаться от работы калориферов котла, освобождая ценный отбор пара из второ-

го отбора турбины. Калориферы в данном случае будут использоваться только в период пусковых операций.

В практических целях при оценке технико-экономических показателей пользоваться детальным расчетом тепловой схемы ввиду сложности несовсем целесообразно. Для конденсационного энергоблока с достаточной точностью можно воспользоваться коэффициентом ценности отбора турбины (КЦОТ). Как правило, отбор можно оценить по двум показателям — коэффициенту недовыработки мощности и коэффициенту ценности тепла отбора, которые изменяются от нуля до единицы, но имеют разный физический смысл.

Коэффициент недовыработки характеризует долю недоработанного теплоперепада пара, идущего в отбор [8]. Коэффициент недовыработки мощности произвольного отбора турбины с промежуточным перегревом распределяется так:

$$y_t = \frac{(h_i - h_2 + h_p - h_k)}{H_i} — \text{до промежуточного перегрева;}$$

$$y_t = \frac{h_i - h_k}{H_i} — \text{после промежуточного перегрева.}$$

Таблица 2

**Определение точки росы при сжигании буровых углей марки Б2
Харанорского и Уртуйского месторождений**

Параметр	Харанорский уголь	Уртуйский уголь
Приведенная сернистость, % кг/МДж	0,026	0,018
Приведенная зольность, % кг/МДж	1,158	0,522
Теоретический объем воздуха, м ³ /кг	3,23	4,61
Теоретический объем водяных паров, м ³ /кг	0,79	0,77
Теоретический объем дымовых газов, м ³ /кг	3,97	5,29
Доля золы в уносе	0,95	0,95
Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах	1,4	1,4
Объем водяных паров в уходящих газах, м ³ /кг	0,810801	0,799688
Объем дымовых газов, м ³ /кг	5,282801	7,163688
Доля водяных паров в уходящих газах	0,153479	0,111631
Атмосферное давление, Па	95325	95325
Разрежение на напоре дымососа, мм. в. ст.	-70	-70
Давление дымовых газов, Па	94638,3	94638,3
Парциальное давление водяных паров, Па	14525,03	10564,55
Температура конденсации водяных паров, °С	53,3	46,9
Температура точки росы, °С	101,7	95,1



Здесь h_i — энталпия пара в отборе, кДж/кг; h_k — энталпия отработанного пара, кДж/кг; h_2 — энталпия пара перед промежуточным перегревом, кДж/кг; H_i — теплоперепад приходящийся на турбину, кДж/кг.

Коэффициент ценности тепла отбора турбины

$$\xi_t = y_t \frac{h_0 - h_{\text{п.в}}}{h_i - h'_k},$$

где h_0 — энталпия острого пара, кДж/кг; $h_{\text{п.в}}$ — энталпия питательной воды, кДж/кг; h'_k — энталпия конденсата пара i -го отбора, кДж/кг.

Наиболее удобен для практического применения коэффициент ценности тепла отбора турбины, так как он позволяет оценивать изменение экономичности отборов турбин при перераспределении нагрузок. Данный коэффициент определяет относительное увеличение полного расхода теплоты турбоустановки на единицу количества теплоты, отпускаемой отбором, по сравнению с конденсационным расходом:

$$Q_{tyr} = Q_{tyk} - \xi_t Q_t,$$

где Q_{tyr} — расход теплоты на турбину, МВт; Q_{tyk} — расход теплоты на турбину, МВт; Q_t — расход теплоты в отбор, МВт.

После несложных преобразований, пренебрегая изменением давления и энталпии в отборе, при постоянстве конденсационной теплоты получим изменение подводимой теплоты к турбине:

$$\Delta Q_{tyr} = \xi_{t1} Q_{t1} - \xi_{t2} Q_{t2}.$$

Причем ξ_t остается практически постоянной на всем диапазоне, поэтому можно данное выражение переписать:

$$\Delta Q_{tyr} = \xi_t \Delta Q_t, \quad \text{или} \quad \Delta D_0 = \xi_{t1} \Delta D_i,$$

где D_0 — расход пара на турбину, кг/с; D_i — расход пара в отбор, кг/с.

Как видно из формулы, изменение расхода пара на турбину прямо пропорционально изменению расхода пара в отбор, а в качестве коэффициента пропорциональности выступает коэффициент ценности теплоты пара отбора.

Однако в полной мере данный коэффициент использовать нельзя, так как он не учитывает влияние системы регенерации. Предлагается для оценки ценности пара отбора использовать следующее отношение:

$$\xi_t = \frac{\Delta D_0}{\Delta D_i}.$$

Коэффициент ξ_1 можно получить путем детального расчета тепловой схемы. Данная процедура весьма трудоемка без наличия программных комплексов, однако может позволить с достаточной точностью оценить ценность отбора, а персоналу станции — разработать мероприятия по оптимизации неэффективных механизмов использования отбора (особо ценный коэффициент при изменении тепловой схемы). Коэффициент ξ_1 по аналогии с коэффициентом ценности тепла отбора турбины будем называть коэффициентом ценности отбора турбины, или сокращено КЦОТ.

На рис. 3, *a* представлена принципиальная схема подогрева холодного воздуха, а на рис. 3, *б* — предлагаемая схема подогрева холодного воздуха. Рассмотрим эффективность предлагаемой схемы, приняв тепловую нагрузку калорифера 2,7 МВт. Для иллюстрации методики расчета, изложенной ранее, будем использовать данный пример.

Определим расход пара на калориферы при давлении пара перед калорифером 0,7 МПа и энталпии пара 3121 кДж/кг. Примем, что дренаж переохлаждается до температуры 80 °С, тогда его энталпия составит 336 кДж/кг, а расход пара на калориферы будет

$$D_{\text{калор}} = \frac{2700}{3121 - 336} = 0,9645 \text{ кг/с.}$$

Увеличение расхода пара на сетевые подогреватели будем определять при равенстве расходов теплоты до и после внедрения мероприятия:

$$D_{\text{калор}} = \frac{2700}{2540 - 430} = 1,2746 \text{ кг/с.}$$

Из расчетов видно, что пара на калориферы более высокого потенциала требуется меньше, чем пара низкого потенциала, однако у пара разная ценность: у 2-го отбора КЦОТ = 1,1, а у шестого — КЦОТ = 0,29 (определенены в результате детального расчета тепловой схемы). При снижении расхода пара со второго отбора на 0,9645 кг/с и увеличении расхода пара на сетевые подогреватели изменение расхода пара на турбину составит

$$\begin{aligned} \Delta D_0 &= \frac{\Delta D_{2\text{отб}}}{\xi_t^2} - \frac{\Delta D_{\text{сет}}}{\xi_t^6} = \\ &= \frac{0,9645}{1,1} - \frac{0,12746}{0,29} = 0,876 - 4,394 = -3,518 \text{ кг/с,} \end{aligned}$$

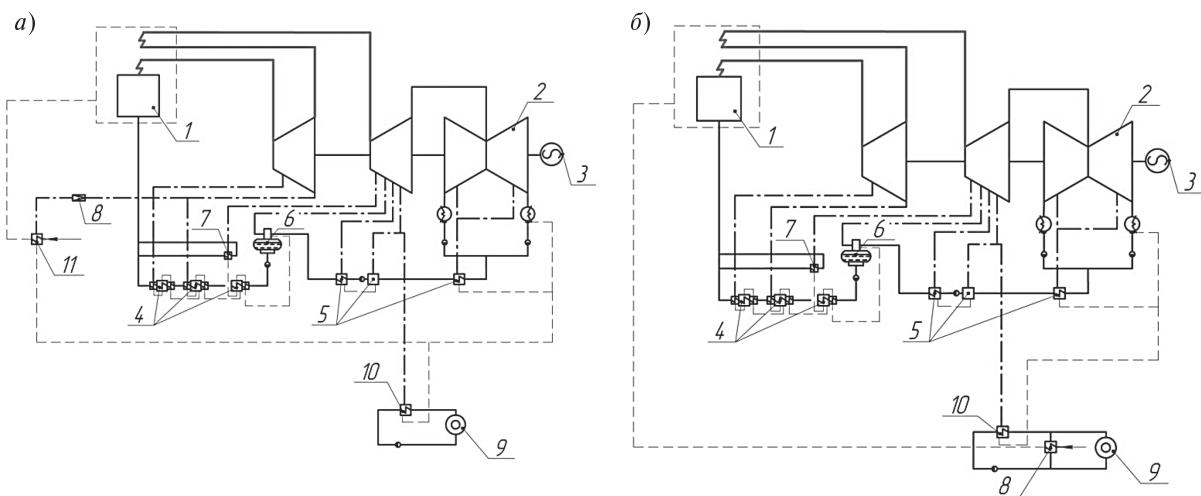


Рис. 3. Схема предварительного подогрева воздуха:

а) 1 — котел; 2 — турбина; 3 — генератор; 4 — группа ПВД; 5 — группа ПНД; 6 — деаэратор; 7 — пароохладитель; 8 — РОУ; 9 — тепловой потребитель; 10 — сетевой подогреватель; 11 — калорифер;
б) 1—7 — то же; 8 — подогреватель воздуха; 9 — тепловой потребитель; 10 — сетевой подогреватель

Снижение расхода теплоты при этом составит (пренебрегаем перегретым паром)

$$\Delta Q = \Delta D_0 (h_0 - h_{\text{п.в}}) = \\ = -3,518(3457 - 987) = 8690 \text{ кВт.}$$

Изменение расхода топлива:

$$\Delta B = \frac{\Delta Q}{Q_{\text{н}}^{\text{p}} \eta_{\text{к.а}} \eta_{\text{т.п}}} \text{ кг/с,}$$

что составит 2611 т у.т. за 3 месяца, или в денежном выражении 3,55 млн руб.

В итоге предлагаемое решение, безусловно, может быть использовано на ТЭС, при-

чем экономический эффект весьма существенен.

Таким образом, из рассмотрения различных вариантов оптимизации предварительного подогрева холодного воздуха видно, что использование для этих целей пара высоких параметров значительно увеличивает затраты на собственные нужды как котла, так и турбины, а принятие довольно простых и недорогостоящих технических решений позволит существенно увеличить эффективность и рентабельность производства электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов, С.А. Оптимизация систем централизованного теплоснабжения с учетом динамических характеристик объективов [Текст] / С.А. Иванов, П.Г. Сафонов, Н.В. Горячих // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2009. № 84.— С. 53–63.
2. Сафонов, П.Г. Способ увеличения экономичности основного оборудования ТЭЦ [Текст] / П.Г. Сафонов, С.А. Иванов, А.Г. Батухтин, И.Ю. Батухтина // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока.— 2010. № 1.— С. 175–178.
3. Goryachikh, N.V. Some methods for making cogeneration stations more maneuverable [Текст] / N.V. Goryachikh, A.G. Batukhtin, S.A. Ivanov // Thermal Engineering.— 2010. T. 57, № 10.— С. 892.
4. Бойко, Е.А. Котельные установки и парогенераторы: учеб.пособие/Е.А. Бойко.— Красноярск, 2005— 292 с.:ил.
5. Бойко, Е.А. Вопросы сжигания высокосернистых мазутов на тепловых электростанциях [Текст]: учеб. пособие / Е.А. Бойко.— Красноярск, 2005.— 38 с.:ил.
6. Безгрешнов, А.Н. Расчет паровых котлов в примерах и задачах [Текст]: учеб. пособие для вузов / А.Н. Безгрешнов, Ю.М. Липов, Б.М. Шлейфер; Под общ.ред. Ю.М. Липова— М.:Энергоатомиздат, 1991.— 240 с.: ил.
7. Эстеркин, Р.И. Промышленные парогенерирующие установки [Текст] / Р.И. Эстеркин— Л.: Энергия. Ленингр. отд-ие, 1980.— 400 с.: ил.
8. Рыжкин, В.Я. Тепловые электрические станции [Текст]: учебник для вузов / Под ред. В.Я Рыжкина.— 3-е изд., перераб. и доп.— М.: Энергоатомиздат, 1987.— 328 с.: ил.



УДК 621.391.825

А.А. Митюгин, В.И. Яковлев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

В современных условиях испытания технического средства (ТС) на электромагнитную совместимость (ЭМС) с конкретной электромагнитной обстановкой в условиях коммутации должны проводиться при воздействии импульсных электромагнитных помех (ЭМП) с реальными характеристиками. В то же время имитация переходного процесса, возникающего из-за короткого замыкания (КЗ), с помощью испытательного генератора микросекундных импульсных помех (ИГ МИП) по ГОСТ Р 51317.4.5–99 основана на приложении к ТС одного импульса напряжения амплитудой 0,5–4 кВ и длительностью 1/50–6,4/16 мкс, получаемого при разряде емкости. В действительности же при отключении тока короткого замыкания возникают многочисленные колебания напряжения с высокими амплитудами, как в начальный момент разведения контактов коммутационного аппарата, так и после погасания электрической дуги.

Так, по данным работ [1, 2], в начальный момент расхождения контактов выключателя до зажигания дуги через микроострий последних при КЗ начинает проходить ток большой плотности (порядка 10^6 – 10^9 А/см²). Скорость роста температуры в этом случае может достигать величины 10¹² К/с и выше, что позволяет обеспечить переход металла через четыре состояния (твердое, жидкое, пар, плазма) за время менее 10⁻⁹ с. В результате возникает «взрывная» электронная эмиссия, сопровождаемая появлением электронного тока. Таким образом, при разрыве тока контактным способом могут наблюдаться следующие процессы:

«взрыв» соединительного мостика из жидкого металла при начальном разведении контактов, который сопровождается появлением электронного тока и высоковольтными импульсами напряжения высокой частоты;

горение электрической дуги, сопровождающееся помехами небольшой (по сравнению с помехами при «взрыве» соединительного мостика) амплитуды;

всплеск высокого напряжения после окончательного погасания дуги при условии ее преждевременного гашения.

Таким образом, одиничный импульс напряжения, подаваемый на вводные клеммы испытуемого технического средства зачастую не отражает реальные коммутационные помехи при отключении КЗ.

Все это требует разработать такой способ испытаний, который учитывает как параметры распределительной системы электроснабжения 0,38/0,22 кВ, так и процессы развития дугового разряда между контактами коммутационного аппарата.

Типичная схема системы электроснабжения 0,38/0,22 кВ представлена на рис. 1, а, где двойными кружками обозначены возможные пути распространения электромагнитных помех при отключении ТКЗ в непосредственной близости у электроприемника.

На рис. 1, б показана расчетная схема системы электроснабжения для определения амплитуды и частоты высоковольтных импульсов, возникающих при отключении тока короткого замыкания.

Экспериментальная установка. На рис. 2, а показана принципиальная схема экспериментальной установки, с помощью которой создаются реальные высоковольтные помехи при отключениях токов коротких замыканий.

Для уменьшения влияния на основную систему электроснабжения экспериментальная установка содержит разделительный трансформатор типа ОСМ-1,0У3 (220/110 В, $f = 50/60$ Гц), выбранный из соображений обеспечения протекания дугового разряда при коммутации. Индуктивность вторичной обмотки рассчитана с использованием метода амперметра и вольтметра и составила 0,068 мГн.

На рис. 2, а обозначены: 1 — разделительный трансформатор; 2 — коммутационный аппарат для отключения КЗ; 3 — магнитный пускатель; 4 — магазин емкостей с переключателем;

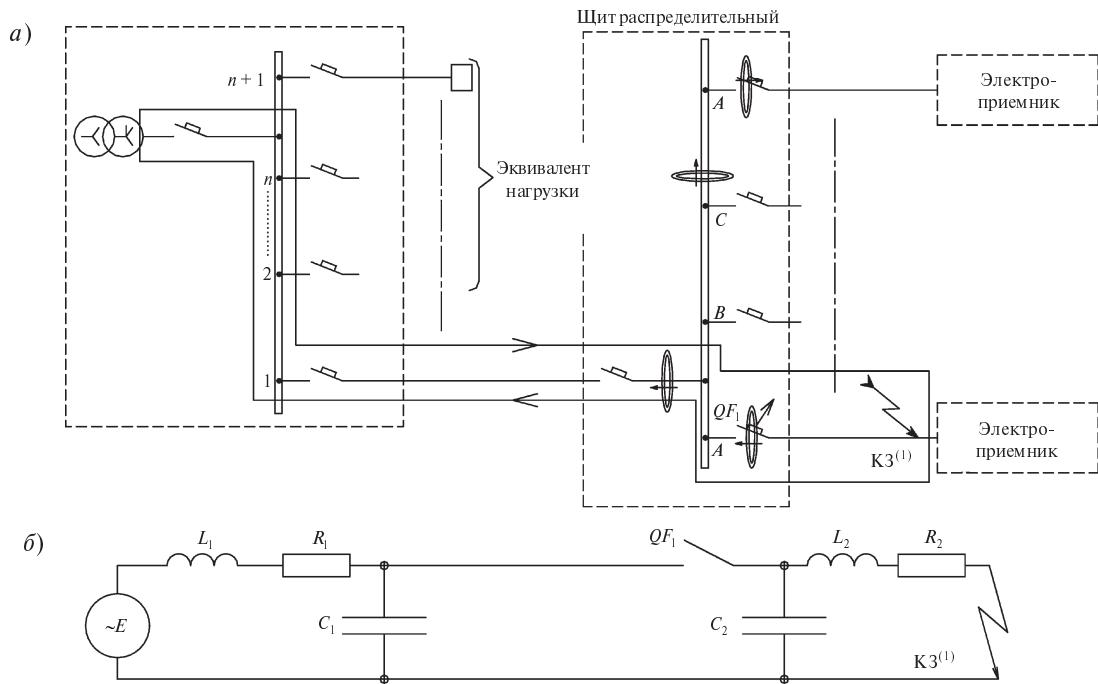


Рис. 1. Схема электроснабжения при отключении тока короткого замыкания:
а — возможные пути распространения помех; *б* — схема для расчета высоковольтных импульсов

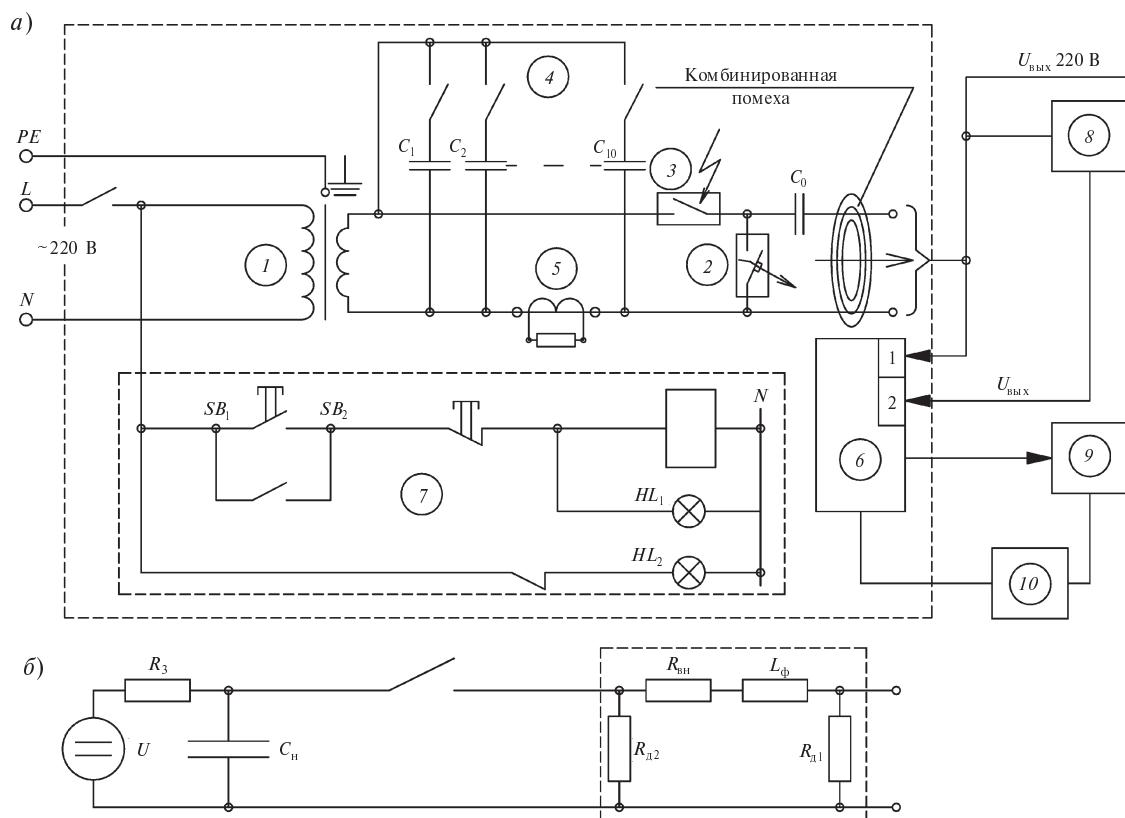


Рис. 2. Принципиальные схемы создания электромагнитных помех:
а — комбинированная реальная помеха; *б* — помеха отдельными имитационными импульсами



5 — трансформатор тока; 6 — Е20-10 (модуль быстродействующего аналого-цифрового преобразования, обеспечивающий непрерывный сбор 16-битных данных с частотой до 10 МГц); 7 — блок подготовки выполнения КЗ; 8 — импульсный блок питания, 9 — ПК; 10 — источник бесперебойного питания.

На рис. 2, б приведена схема для создания имитирующих ЭМП с помощью подключения ИГ МИП согласно ГОСТ Р 51317.4.5—99. Здесь: U — источник высокого напряжения; R_3 — зарядный резистор; C_k — зарядный конденсатор; R_{d1} и R_{d2} — резисторы, определяющие длительность импульса; R_{bh} — резистор, определяющий выходное полное сопротивление ИГ; L_Φ — индуктивность, определяющая время нарастания импульса.

Короткое замыкание во вторичной цепи осуществляется с помощью мощного магнитного пускателя. Управление пускателем выполняется кнопками SB_1 и SB_2 . Магнитный пускатель замыкает вторичную цепь, далее происходит ее автоматическое отключение при помощи выключателя с уставкой $C6A$, при этом образуются комбинированные электромагнитные помехи. Воздействие на работу технических средств осуществляется путем подачи электромагнитной помехи на вводные клеммы технического средства через связующую емкость величиной $C_0 = 18 \text{ мкФ}$ (рис. 2, а).

Установка предусматривает исследование электромагнитных помех, возникающих как

в мало разветвленной системе электроснабжения $0,38/0,22 \text{ кВ}$, чему соответствует включение небольшой емкости от 400 до 3000 пФ , так и в сильно разветвленной системе электроснабжения, чего добиваются подключением большой емкости. Для этого применяется батарея конденсаторов емкостью $C_1 - C_{10}$ (от 400 пФ до 100 мкФ) с кулачковым переключателем.

Передача параметров процесса отключения тока короткого замыкания на компьютер выполняется с помощью аналого-цифрового преобразователя напряжения АЦП L-Card E20-10.

Осциллограммы, полученные с помощью экспериментальной установки, приведены на рис. 3. На рис. 3, а показана одна из осциллограмм напряжения на автоматическом выключателе при отключении токов КЗ, снятая с использованием цифрового запоминающего осциллографа BM8021 с полосой пропускания аналогового сигнала 20 МГц , работающего в режиме «пиковый детектор». Из осциллограммы видно, что высоковольтные импульсные помехи амплитудой $5\text{--}6 \text{ кВ}$ могут возникать как в начальный момент разведения контактов (импульс 1 рис. 3, а) в результате «взрывной» электронной эмиссии, так и в самом конце процесса (импульс 3, рис. 3, а, а также импульсная кривая на рис. 3, б, записанная прибором АЦП E20-10), что вызвано преждевременным гашением дуги.

На рис. 4 приведена осциллограмма первичного и вторичного напряжения импульсного бло-

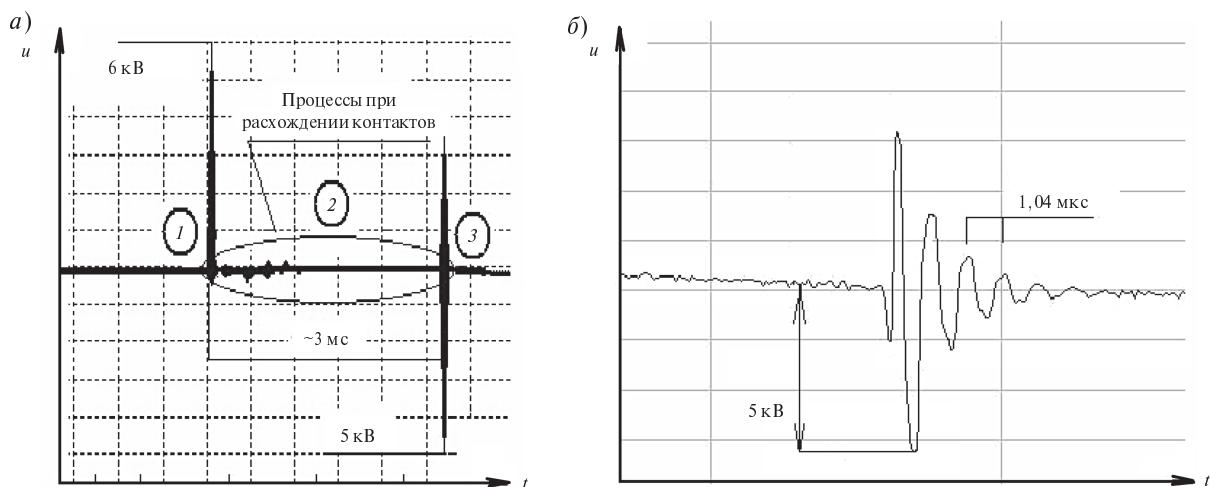


Рис. 3. Экспериментальные осциллограммы:

а — процесс при расхождении контактов: 1 — момент времени до зажигания дуги, 2 — горение дуги, 3 — момент времени погасания дуги;

б — развертка импульсной кривой 3 (погасание дуги при токе $12,1 \text{ А}$; емкость — 400 пФ , индуктивность трансформатора — $0,068 \text{ мГн}$)

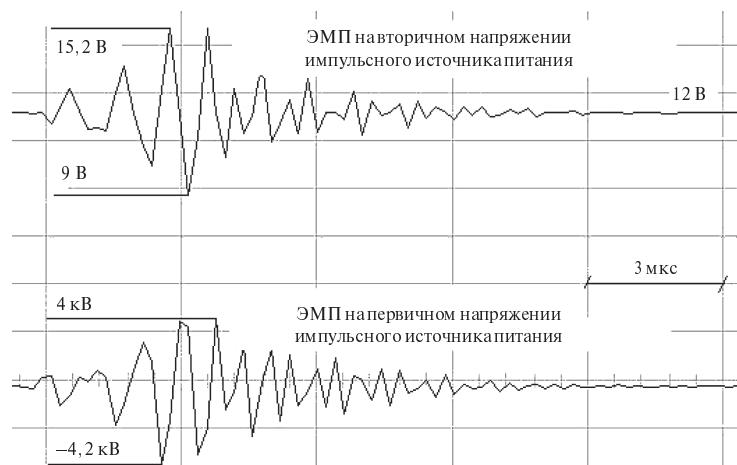


Рис. 4. Влияние помехи на импульсный источник питания

ка питания при наложении электромагнитной помехи, предшествующей зажиганию дуги, на сетевое питание. Запись выполнена с использованием АЦП Е20-10. Из осциллограммы видно, что импульсная помеха, проходящая через импульсный источник питания, значительно превышает необходимое напряжение 12 В и имеет сложный характер.

Расчетная оценка возникновения ЭМП после погасания дуги. При отключении КЗ в цепи (рис. 1, б) будут протекать два независимых процесса, при этом частота и амплитуда возникающих колебаний будут зависеть от параметров L_1 и C_1 , L_2 и C_2 , а также от фазы прохождения тока в момент разрыва цепи.

После отключения тока короткого замыкания цепь делится на «до» и «после» отключающего коммутационного аппарата.

Левая часть схемы содержит индуктивность L_1 , которая представляет в основном индуктивность обмотки трансформатора подстанции, и суммарную емкость C_1 всех распределительных шин, кабельных линий и т. д. Правая часть схемы будет иметь индуктивность и емкость кабельной линии после коммутационного аппарата, так как возникающее короткое замыкание шунтирует нагрузку.

Суммарная электрическая емкость C_1 после разделительного трансформатора имеет малое значение, что вызывает возникновение электромагнитных помех высокой амплитуды и частоты.

Помеха за коммутационным аппаратом при условии шунтирования нагрузки в основном имеет достаточно высокочастотный характер, что обусловлено прежде всего параметрами L_2

и C_2 отключаемой кабельной линии. Основополагающим при определении амплитуды помех является так называемый ток среза — преждевременное гашение дуги до естественного перехода через ноль. В основном дуга гаснет при достижении тока порядка 0,1–1 А. Однако нередки случаи с более высоким значением.

Расчет переходного процесса при коммутации по упрощенной схеме, показанной на рис. 1, б, выполнялся классическим методом. Предварительно символическим методом до коммутации при КЗ рассчитывались токи i_{L0} в индуктивностях и напряжения u_{C0} на емкостях. Заданный момент времени размыкания ключа определяет напряжение в начале коммутационного процесса: $U = U_m e^{j\psi}$. Ток в индуктивности и напряжение на емкости для каждой части цепи, возникшей после отключения, при произвольном угле ψ составляют соответственно

$$i_{L0} = |I| \sin(\arg I), \quad u_{C0} = |U_C| \sin(\arg U_C).$$

Расчеты для левой и правой частей цепи проводятся аналогично, поэтому дальше приводятся результаты для левой части, в которой после отключения продолжает действовать источник напряжения.

Установившийся режим после коммутации рассчитывается для каждой части цепи также символическим методом. В частности для левой части цепи установившийся ток и напряжение на емкости представляются следующим образом:

$$i_{\text{уст}}(t) = |I_{\text{уст}}| \sin(\omega t + \arg I_{\text{уст}});$$

$$u_{C\text{уст}}(t) = |U_{C\text{уст}}| \sin(\omega t + \arg(U_{C\text{уст}})).$$



Переходный процесс описывается следующими уравнениями:

$$i_L - i_C = 0;$$

$$R_L i_L + L_1 \frac{di_L}{dt} + \frac{1}{C_1} \int i_C dt = U_m \sin(\omega t + \psi).$$

Для однородного уравнения

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ R_L + pL_1 & 1/pC_1 \end{bmatrix} = 0$$

рассчитываются корни. Мнимая часть корней определяет собственную частоту цепи.

Для нахождения решения уравнений переходного процесса сначала определяют начальные условия для зависимых переменных, какими являются i'_C , i'_L , u'_C , i_C , где штрихом обозначаются производные соответствующих переменных. Независимые переменные $-i_L$ и u_C .

Система уравнений для определения зависимых переменных i'_C , i'_L , u'_C , i_C получается при $t = 0$ из уравнений переходного процесса с добавлением как продифференцированного уравнения $i_L - i_C = 0$, в котором нет производных, так и уравнения связи $C_1 u'_C(t) - i_C(t) = 0$, и в матричном виде она имеет вид

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -L_1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_C \\ i'_L \\ u'_C \\ i_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{L0} \\ U_m \sin \psi - R_L i_{L0} + u_{C0} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Решения для токов $i_L(t)$, $i_C(t)$ и напряжения $u_C(t)$ будут такими:

$$i_L(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + i_{Lyct}(t);$$

$$i_C(t) = B_1 e^{p_1 t} + B_2 e^{p_2 t} + i_{Cyct}(t);$$

$$u_C(t) = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t} + u_{Cyct}(t).$$

Система уравнений для определения постоянных интегрирования $A1-C2$ имеет вид

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ p_1 & p_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_1 & p_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_1 & p_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ B_1 \\ B_2 \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} i_L(0) - i_{Lyct}(0) \\ i_C(0) - i_{Cyct}(0) \\ u_C(0) - u_{Cyct}(0) \\ i'_L(0) - \omega |I_{yct}| \cos[\arg I_{yct}] \\ i'_C(0) - \omega |I_{yct}| \cos[\arg I_{yct}] \\ u_C(0) - \omega |U_{yct}| \cos[\arg U_{Cyct}] \end{bmatrix}.$$

Результаты расчета для экспериментальной осциллограммы рис. 3, б, полученные по выше приведенному способу, имеют погрешность по амплитуде и частоте, не превышающую $\pm 15\%$.

Заключение

Разработана экспериментальная установка для исследования электромагнитных помех, возникающих при отключении токов короткого замыкания в распределительных сетях 0,38/0,22 кВ, и их влияния на работу технических средств.

Амплитуда помехи, возникающая до зажигания дуги, обусловленная «взрывной» электронной эмиссией, достигает 4–6 кВ, что выше, чем 4-я степень жесткости испытаний. ЭМП после прекращения горения дуги зависит от волнового сопротивления отключаемых контуров и величины тока среза.

Получена оценка возможного появления помех при отключении линий с известным волновым сопротивлением на основе вероятностных значений среза тока установочных автоматов с номинальными токами С3, С6 и С10А: 28 % – 1,0 А; 24 % – 2,5 А; 19 % – 3,5 А; 15 % – 5,0 А, 14 % – погасание дуги при переходе тока через значение, близкое к нулю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месяц, Г.А. Импульсная энергетика и электроника [Текст] / Г.А. Месяц.— М.: Наука, 2004.— 704 с.
2. Раховский, В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме [Текст] / В.И. Раховский.— М.: Наука, Глав. ред. физ.-мат. лит., 1970.— 536 с.

УДК 621.039

E.B. Анисимова, Ю.В. Богданов

ПЕРСПЕКТИВНОЕ ИННОВАЦИОННОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗООХЛАЖДАЕМЫХ РЕАКТОРОВ В ПЛАВУЧИХ АТЭС

В июне 2010 года со стапелей Балтийского судостроительного завода в Санкт-Петербурге была спущена на воду для последующей достройки и проведения ходовых испытаний первая в мире плавучая атомная теплоэлектростанция (ПАТЭС) «Академик Ломоносов» (рис. 1). Этого события в нашей стране ждали давно — люди старшего поколения помнят макет плавучей АТЭЦ «Север-2», экспонировавшийся на ВДНХ в павильоне «Атомная энергия» еще в 80-е годы прошлого века (рис.2).

Вся техническая интеллигенция России испытала законную гордость за это научно-техническое достижение, которое пришлось на очень трудные годы: от участия в международном конкурсе проектов ПАТЭС в 1991 году, где победителем были признаны отечественные разработки, утверждения техпроекта ПАТЭС в 2002 году и до проведения конкурса в нашей стране на сооружение ПАТЭС в 2006 году.

В техпроекте ПАТЭС «Академик Ломоносов» воплощены самые передовые отечественные наработки в проектировании транспортных установок малой и средней мощности с атомными реакторами [1]. Генеральным проектировщиком ПАТЭС является ЗАО «Атомэнерго», привлечь к проектированию ОАО ЦКБ «Айсберг», которое имеет большой опыт работы по проек-

тированию атомных ледоколов. Главный конструктор реакторной установки типа КЛТ-40, принятой на ПАТЭС и проверенной в эксплуатации на ледоколах «Таймыр» и «Вайгач», — ОАО «ОКБМ имени И.И. Африканова». Изготовитель турбины ТК-35/38 — Калужский турбинный завод, поставщик турбин для ледокольного флота России.

ПАТЭС «Академик Ломоносов» оснащена двумя реакторными установками КЛТ-40 общей тепловой мощностью 300 МВт, электрической мощностью 70 МВт. Она предназначена для энергоснабжения удаленных районов Крайнего Севера и Дальнего Востока РФ.

«Академик Ломоносов», головной проект серии из семи ПАТЭС стоимостью 16 млрд руб. каждая, имеет габариты 144×30 м, водоизмещение 21,5 тыс. т и рассчитан на 38 лет службы (3 цикла по 12 лет с годовыми перерывами на перевозку топлива и профилактический ремонт) [1]. Хотя стоимость ПАТЭС относительно высока — 240 млн руб. за 1 МВт мощности (в ценах 2009 года), ее окупаемость составляет всего 7 лет, а при серийном строительстве стоимость снижается на 30–40 %. Но с учетом нарастающего дефицита в энергоснабжении очень важных для России стратегических и экономических районов Дальнего Востока, связанного с развитием гор-



Рис. 1. ПАТЭС «Академик Ломоносов»

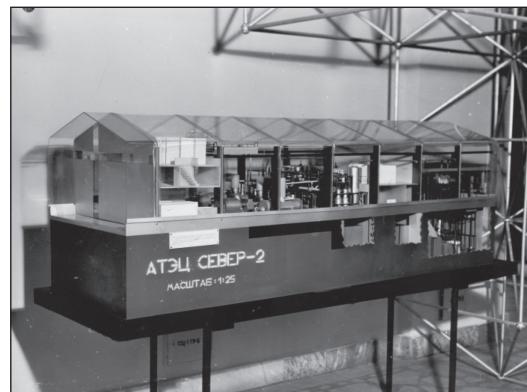


Рис. 2. Макет плавучей АТЭЦ «Север-2»



нодобывающей промышленности и с одновременным выводом из эксплуатации Билибинской АТЭЦ (в 2020 году) и Чаунской ТЭЦ, использование ПАТЭС в данном случае экономически оправданно, тем более что в настоящее время альтернативного варианта нет. Первая ПАТЭС, «Академик Ломоносов», спроектирована для энергоснабжения Вилючинска на Камчатке, вторая ПАТЭС пойдет в бухту Певек на Чукотке, третья — в пос. Черский.

Специфические условия эксплуатации ПАТЭС потребовали от проектировщиков выполнения особых требований по надежности и безопасности, связанных с автономностью ее работы. Весь обслуживающий персонал ПАТЭС составляет 70 специалистов, что для таких удаленных, изолированных от научно-технических центров атомной энергетики объектов представляется недостаточным. Хотя реакторные установки КЛТ-40 доказали свою надежность на эксплуатируемых атомных ледоколах арктического флота (правда, с возможным в случае необходимости техническим обследованием и профилактическим ремонтом), гипотетическую максимальную проектную аварию с потерей водного теплоносителя на ПАТЭС исключать все же нельзя. Кроме того, в настоящее время приходится признавать и теоретическую возможность совершения террористического акта на ПАТЭС, и связанную с ним инициированную аварийную ситуацию на ПАТЭС.

В связи с этими обстоятельствами следует иметь в виду возродившийся в последнее десятилетие повышенный интерес научных кругов к высокотемпературным газоохлаждаемым реакторам (ВТГР) как инновационному направлению в атомной энергетике [2], что связано прежде всего с бесспорными преимуществами ВТГР по сравнению со всеми другими типами ядерных реакторов.

Среди достоинств ВТГР наиболее существенно следующее:

практически абсолютная надежность и безопасность ВТГР, исключающая возможность плавления активной зоны при потере теплоносителя;

гелиевый теплоноситель обладает высокой термической и радиационной стойкостью, химически инертный даже при высоких температурах;

«керамическое» топливо с многослойным покрытием из пироуглерода обладает отличной радиационной стойкостью, способностью удер-

живать продукты деления, химической инертностью и очень высокой температурой плавления;

в отличие от реакторов других типов в ВТГР производится тепловая энергия высокого потенциала ($850-1000^{\circ}\text{C}$), которая позволяет доводить КПД всей энергетической установки с гелиевой турбиной до 44–50 % (!);

высокая температура теплоносителя в ВТГР позволяет получать от установки, кроме электроэнергии, высокопотенциальное тепло, которое может быть использовано как для технологических целей, так и для бытового и промышленного теплоснабжения;

гипотетическая авария, связанная с потерей гелиевого теплоносителя и выбросом его в окружающую среду, не представляет угрозы для обслуживающего персонала и населения, так как

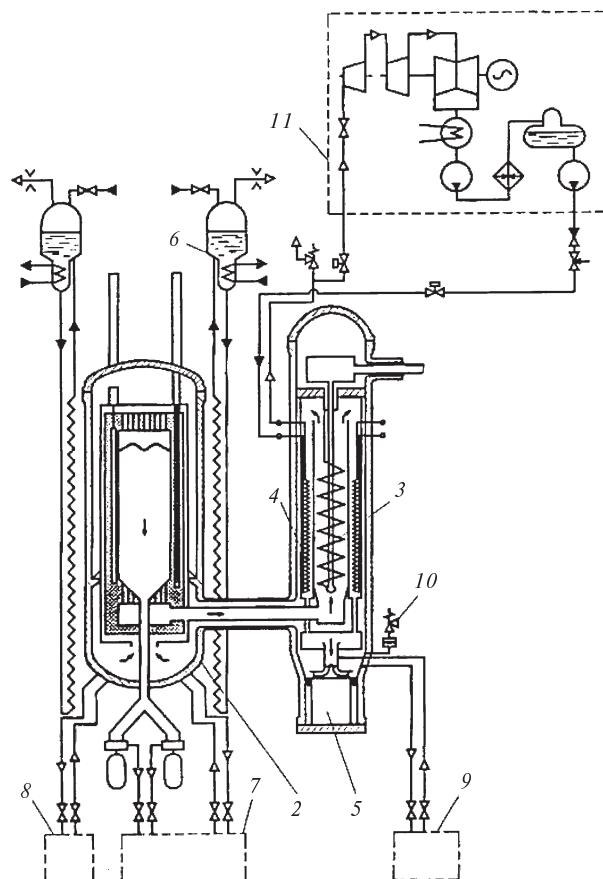


Рис. 3. Реактор ВГМ-200:

1 — реактор; 2 — силовой корпус; 3 — промежуточный теплообменник; 4 — парогенератор; 5 — газодувка; 6 — система охлаждения; 7 — система циркуляции твэлов; 8 — система поглощающих шариков; 9 — система очистки гелия; 10 — сбросной клапан; 11 — система паровой турбины (преобразования энергии)

гелий как теплоноситель практически не активируется при работе ВТГР [3, 4].

В нашей стране научные исследования по разработке ВТГР и атомных станций на их базе в 80-х годах находились на высоком уровне, соответствующем передовым научным достижениям европейских стран и США. Решением этой проблемы успешно занимались авторитетные научные коллективы ИАЭ имени И.В. Курчатова, ОКБМ имени И.И. Африканова, ВНИИАМ, НИИАР, ВНИПИЭТ, а также и ЛПИ (ныне СПбГПУ) [2, 5, 6].

Еще в 1974 году был разработан проект опытно-промышленного реактора ВГР-50 в прочноплотном стальном корпусе тепловой мощностью 136 МВт с гелиевым теплоносителем и непрерывной перегрузкой топлива в виде шаровых твэлов. В 1980–81 годах активно велись работы по техническому проекту реактора ВГ-400 (в корпусе из ПНЖБ тепловой мощностью 1000 МВт также с гелиевым теплоносителем температурой 950 °C), который предназначался для промышленных установок энерготехнологического назначения. А наиболее продвинутым проектом ОКБМ «Африканов» и ВНИИАМ, разработанным при

научном руководстве ИАЭ им. И.В. Курчатова, является ВТГР типа ВГМ-200 модульной конструкции в стальном корпусе с шаровыми твэлами в виде свободной засыпки и гелиевым теплоносителем (рис. 3).

После многолетнего перерыва в научных исследованиях и проектных работах по ВТГР, связанного с перестройкой и экономическим кризисом в нашей стране, в 1997 году предприятиями Минатома России совместно с фирмами США был разработан перспективный концептуальный проект модульного ВТГР с гелиевой турбиной ГТ-МГР [2]. Помимо отмеченных выше достоинств ВТГР, в модульном реакторе ГТ-МГР подтверждена возможность и экономическая эффективность использования его для утилизации оружейного плутония — реальный путь решения одной из актуальных проблем МАГАТЭ.

Энергетическая установка ГТ-МГР состоит из двух блоков — модульного высокотемпературного реактора (МГР) и газотурбинного преобразователя энергии прямого цикла (ГТ) (рис. 4). Габариты этих блоков позволяют организовать их изготовление и транспортировку с заводов-изготовителей автомобильным или водным транспортом, что может упростить и удешевить решение многих проблем атомной энергетики, в том числе и энергоснабжение труднодоступных районов Крайнего Севера и Дальнего Востока.

ГТ-МГР — реакторная установка нового поколения, разработанная на основе передовых мировых технологий и 30-летнего российского опыта научных исследований и проектирования ВТГР (реакторы ВГР-50, ВГ-400 и ВГМ). Присущие установке ГТ-МГР отличные энергетические показатели и уникальные свойства внутренней безопасности (невозможность плавления активной зоны за счет отрицательного температурного коэффициента реактивности) приводят к обоснованному выводу о ее существенных преимуществах по сравнению с реакторными установками других типов и экономической целесообразности использования в ближайшей перспективе для атомных станций малой и средней мощности. Основные характеристики отечественных реакторных установок малой мощности приведены в таблице.

Применение ВТГР, в том числе и ГТ-МГР, в ПАТЭС позволяет достичь большого экономического эффекта и расширить экспортные пер-

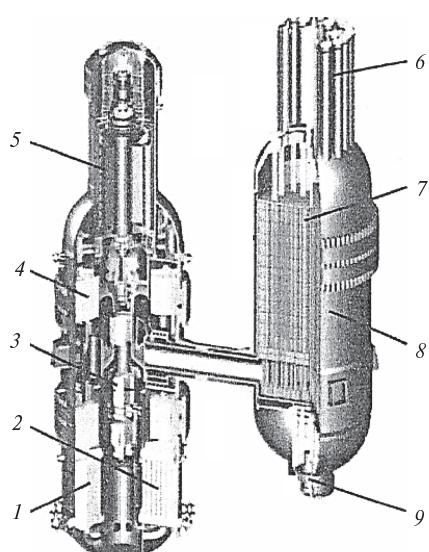


Рис. 4. Энергетическая установка ГТ-МГР:

- 1 — генератор; 2 — модуль рекуператора;
- 3 — турбокомпрессор; 4 — модуль промежуточного холодильника;
- 5 — модуль предварительного холодильника;
- 6 — сборка СУЗ;
- 7 — активная зона;
- 8 — система охлаждения корпусов;
- 9 — система охлаждения остановленного реактора



Основные характеристики отечественных реакторных установок малой мощности

Название параметра	Значения параметра для разных установок				
	ВТГР-500	ВГР-400	ВГМ-200	ГТ-МГР	КЛТ-40
Тепловая мощность, МВт	136	1060	200	600	150
Электрическая мощность, МВт	50	300	50	290	38,5
Компоновка реактора	Модульная	Интегральная	Модульная	Модульная	Модульная
Число петель, лт	1	4	1	1	4
Материал корпуса	Сталь	ПНЖБ	Сталь	Сталь	Сталь
Температура теплоносителя, °С					
на входе	810	950	750(950)	850	316
на выходе	296	350	300	490	280
Давление гелия, МПа	4,0	5,0	7,0	7,15	12,7
Размер активной зоны, м:					
диаметр	2,8	6,4	3,0	4,84	1,22
высота	4,5	4,8	9,4	8,0	1,30
Тип твэла	Шаровой	Шаровой	Шаровой	Призматический	Цилиндрический
Наружный диаметр твэла (ТВС), мм	60	60	60	Под ключ 360	62
Топливо и начальное обогащение	Уран	Уран, 6,5 %	Уран, 8 %	Плутоний, 84 %	Уран, 18,6 %
Кампания одной загрузки, эф. сут	450	6320	950	—	916
Параметры пара во втором контуре					
давление, МПа	—	17,5	—	—	3,72
Температура, °С	—	535	—	—	298
КПД	—	~70	—	48	—
Срок службы, лет	—	—	—	60	50

пективы ПАТЭС. К заказам ПАТЭС в России уже проявили большую заинтересованность более десяти стран Азии, Африки и Южной Америки, причем не только как источникам электроэнергии, но и как опреснительным установкам.

Конечно, для ПАТЭС с различными типами реакторных установок важное значение имеют технико-экономические характеристики, в частности себестоимость тепловой и электрической энергии. И для новых технологий ПАТЭС с ВТГР эти характеристики по сравнению с аналогичными для стационарных АЭС с блоками мощностью 1000 МВт будут несопоставимы. Однако такое сравнение, естественно, некорректно, так как в данном случае следует рассматривать генерирующие источники в одном диапазоне мощности (Билибинская АТЭЦ, ТЭЦ на местном и привозном органическом топливе, дизельные станции) [7]. Если же учесть перечисленные выше преимущества ВТГР, которые не всегда

могут быть оценены в финансовом отношении (например, надежность и безопасность), то это направление в создании АЭС малой мощности можно обоснованно считать перспективным.

Разработкой АЭС малой и средней мощности, в том числе и для ПАТЭС, вплотную занялись в Японии, США, Южной Корее, Китае, Индии, Аргентине и ЮАР. Некоторые из них — прямые конкуренты России в мощностном диапазоне реакторных установок для ПАТЭС. Утрата лидирующих позиций нашей страны в этой области атомной энергетики совершенно недопустима как в экономическом, так и в политическом аспектах.

В связи с этим освоение ВТГР для энергобез обеспечения районов Крайнего Севера и Дальнего Востока и для выхода на мировой рынок необходимо признать одним из первоочередных инновационных направлений в развитии атомной энергетики России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новорефтов, Р. Малые да удалые [Электронный ресурс] / Р. Новорефтов.— Интернет-портал сообщества ТЭК.— ЭНтерра, 2010.
2. Гребенник, В.Н. Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы — инновационное направление развития атомной энергетики [Текст] / В.Н. Гребенник, Н.Е. Кухаркин, Н.Н. Пономарев-Степной.— М.: Энергоатомиздат, 2008.
3. Кодочигов, Н.Г. Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы— перспективная технология будущего [Текст] / Н.Г. Кодочигов // Энергетика и промышленность России.— 2010.— № 18.
4. Анисимова, Е.Б. Перспективы создания ядерно-энергетических комплексов на базе высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР) [Текст] / Е.Б. Анисимова, Ю.В. Богданов // XXXIX Неделя науки СПбГПУ: Матер. междунар. научно-практ. конф. Часть 1.— СПб., 2010.
5. Богданов, Ю.В. Исследование течения теплоносителя в каналах ВТГР [Текст] / Ю.В. Богданов [и др.] // Отчет о НИР № 6039 / ЛПИ.— Л., 1980.
6. Богданов, Ю.В. Моделирование и методика исследований гидродинамики каналов ВТГР с шаровыми твэлами [Текст] / Ю.В. Богданов [и др.] // Труды ЛПИ. № 370.— Л.: Изд-во ЛПИ, 1981.
7. Никитин, А.А. Плавучие атомные станции [Текст] / Л. Никитин, Л. Андреев.— Доклад объединения «Bellona» [Электрон. ресурс] // <http://www.bellona.org/fillarchive/fil1npps-russian.pdf>.— 20.12.2011.

УДК 621.224.7

В.М. Румахеранг, Г.И. Топаж, А.В. Захаров

МЕТОДИКА РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГИДРОТУРБИН

Одним из основных факторов, оказывающих значительное влияние на рабочий процесс гидромашины, являются кавитация и сопутствующая ей кавитационная эрозия. Кавитация приводит к целому ряду отрицательных последствий: ухудшению энергетических характеристик гидромашины, резкому увеличению шума и вибраций, разрушению поверхности лопастей рабочего колеса. В результате сокращается межремонтный период, увеличивается продолжительность ремонтов, их трудоемкость и стоимость. При достаточно развитой кавитации происходит резкое падение КПД турбины и срыв мощности [1]. Гидротурбины многих действующих ГЭС в той или иной степени подвержены кавитации и кавитационной эрозии, что значительно снижает их экономичность, надежность и срок эксплуатации.

В теории гидротурбин для оценки кавитационных показателей рассматриваются безразмерные кавитационные коэффициенты установки $\sigma_{уст}$ и турбины σ_t . Кавитационный коэффициент установки определяется по формуле

$$\sigma_{уст} = \frac{(P_{уст} - P_{вп})}{\rho g H}, \quad (1)$$

где $P_{уст}$ — условная величина барометрического давления в области рабочего колеса; $P_{вп}$ — дав-

ление парообразования, зависящее от температуры жидкости; ρ — плотность жидкости; H — напор. Для натурных гидростанций $P_{уст}/(\rho g) = B - H_S$, где B — барометрическое давление на нижнем бьефе ГЭС; H_S — высота отсасывания, характеризующая высоту расположения рабочего колеса над нижнем бьефом.

При уменьшении $P_{уст}$ и, соответственно, кавитационного коэффициента установки $\sigma_{уст}$ уменьшается давление в области рабочего колеса, что может привести к образованию кавитации.

Необходимым условием возникновения кавитации в какой-либо точке лопасти рабочего колеса является уменьшение давления в этой точке до давления насыщенных водяных паров $P_{вп}$. Разность между давлением в любой точке лопасти и давлением водяных паров определяется по формуле

$$(P - P_{вп})/(\rho g H) = \sigma_{уст} - C_p, \quad (2)$$

где C_p — безразмерный коэффициент, равный по величине и обратный по знаку коэффициенту давления $P^* = (P - P_{уст})/(\rho g H)$.

Распределение коэффициентов давления по поверхности лопасти может быть найдено теоретически в результате расчета обтекания лопастей рабочего колеса на рассматриваемом режи-



ме. Кавитация возникает в точках лопасти, в которых коэффициент C_p становится равным или больше заданного значения кавитационного коэффициента установки $\sigma_{уст}$.

Минимальное значение $\sigma_{уст}$, при котором еще допускается эксплуатация гидротурбины (исходя из условия изменения КПД за счет кавитации), называют кавитационным коэффициентом турбины. В соответствии с международным кодом модельных испытаний гидравлических турбин принято выбирать в качестве значения кавитационного коэффициента турбины σ_t такое значение $\sigma_{уст}$, при котором происходит падение КПД на один процент.

Обычно значения σ_t определяют путем проведения экспериментальных исследований моделей гидротурбин на специальных кавитационных стендах [1]. Кавитационный стенд представляет собой замкнутую установку, в которой с помощью вакуумного насоса можно в широких пределах менять значения $P_{уст}$ и, соответственно, величины $\sigma_{уст}$. Определяя для фиксированного режима значения КПД гидротурбины (η) при различных значениях $\sigma_{уст}$, можно построить так называемую «срывную» характеристику, т. е. зависимость $\eta = f(\sigma_{уст})$ (рис. 1), и найти для этого режима величину кавитационного коэффициента турбины σ_t . Именно значения σ_t характеризуют кавитационные качества гидротурбины, т. е. ее способность противостоять кавитации.

Следует отметить, что задача определения кавитационных коэффициентов турбины чрезвычайно важна, поскольку от него зависит допустимая высота отсасывания, т. е. максимально возможная по условиям кавитации высота расположения рабочего колеса над уровнем нижнего бьефа, определяемая по формуле

$$H_{S_{\max}} = B - \frac{P_{вп}}{\rho g} - \sigma_t H \approx 10 - \sigma_t H. \quad (3)$$

Величина $H_{S_{\max}}$ — один из основных технико-экономических показателей, определяющих возможность установки того или иного варианта гидротурбины на данной ГЭС. Учитывая сказанное, а также то обстоятельство, что экспериментальные исследования кавитационных показателей гидромашин очень дороги и трудоемки, очевидны актуальность и большое практическое значение разработки расчетного мето-

да, позволяющего эффективно и с достаточной точностью определить значения кавитационного коэффициента турбины.

Рассмотрим основные положения методики, предложенной в работе [4], которая позволяет расчетным путем определить «срывную» характеристику гидротурбины и найти ее кавитационные показатели.

КПД гидротурбины определяется по формуле

$$\eta = \frac{M_{\omega}}{\rho g Q H}, \quad (4)$$

где M — крутящий момент на валу гидротурбины; Q — расход; ω — угловая частота вращения рабочего колеса. Из формулы (3) видно, что на фиксированном режиме работы гидротурбины ($Q = \text{const}$, $H = \text{const}$, $\omega = \text{const}$) изменение ее КПД может происходить только за счет изменения крутящего момента. Крутящий момент зависит от распределения давлений по поверхности лопасти и может быть найден по формуле

$$M = \int r p dS_M. \quad (5)$$

Здесь r — радиус; p — величина давления на элементарной площадке dS_M меридиональной проекции поверхности лопасти рабочего колеса.

При возникновении кавитации происходит изменение распределения давлений по поверхности лопасти рабочего колеса по сравнению с распределением давлений при ее безкавитационном обтекании и, как следствие этого, меня-

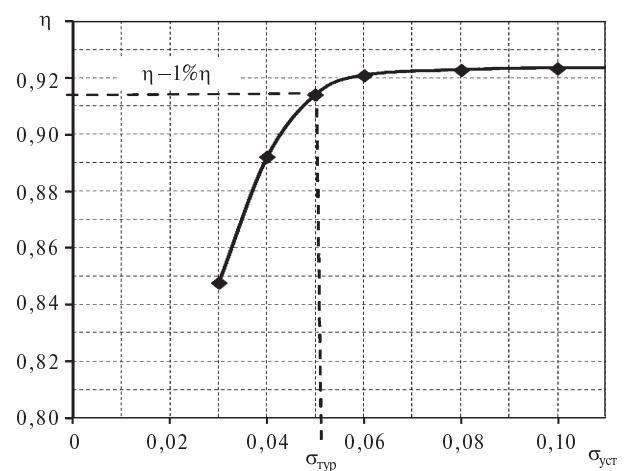


Рис. 1. «Срывная» характеристика
(зависимость $\eta = f(\sigma_{уст})$)

ется величина крутящего момента. Поэтому для рассматриваемого режима относительное изменение КПД гидротурбины, которое вызвано кавитацией, можно найти по формуле

$$\eta^* = \frac{\eta_{\text{кав}}}{\eta_0} = \frac{M_{\text{кав}}}{M_0}, \quad (6)$$

где индексы «кав» и «0» относятся к величинам КПД и крутящего момента для случаев соответственно кавитационного и безкавитационного обтекания лопасти рабочего колеса.

В зависимости от величины $p_{\text{уст}}$ или кавитационного коэффициента установки $\sigma_{\text{уст}}$ на рассматриваемом режиме могут возникать различные формы и стадии кавитации. По мере уменьшения значений $\sigma_{\text{уст}}$ сначала возникает пузырьковая кавитация, при которой распределение давлений по лопасти мало меняется по сравнению с давлениями при отсутствии кавитации. Дальнейшее уменьшение значений $\sigma_{\text{уст}}$ приводит к возникновению пленочной кавитации, для которой характерно усиление шума и вибраций, а также заметное изменение характера распределения давлений по поверхности лопасти. При развитой пленочной кавитации КПД гидротурбины резко падает. В этом случае за счет перераспределения давлений по лопасти рабочего колеса происходит изменение величины крутящего момента и в соответствии с формулами (4), (5) КПД гидротурбины.

Таким образом, если при различных значениях кавитационного коэффициента установки $\sigma_{\text{уст}}$ решить для заданного режима прямую задачу расчета обтекания лопастей рабочего колеса и найти для каждого значения $\sigma_{\text{уст}}$ распределение давлений по поверхности лопасти, можно, используя зависимости (4) и (5), построить расчетную «срывную» характеристику.

Экспериментальные и расчетные исследования показали, что в области пленочной каверны давление практически постоянно и близко к давлению парообразования. Это обстоятельство было использовано в работе [4] для приближенного расчета распределения давлений по лопасти рабочего колеса при ее кавитационном обтекании при различных значениях кавитационного коэффициента установки.

Уже разработаны методы и программы расчета трехмерного турбулентного течения вязкой жидкости в турбомашинах. В частности, получили широкое распространение коммерческие про-

граммные продукты CFX, STAR-CD, FLUENT, NUMECA и другие. Указанные программы позволяют определить на заданном режиме распределение коэффициентов давления по лопасти рабочего колеса.

В данной работе расчет трехмерного вязкого турбулентного течения жидкости проводился на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса с использованием программного комплекса FINE™/Turbo [6]. В расчете использовалась стандартная $k - \varepsilon$ модель турбулентности.

Для расчета кавитации использовалась баротропная модель [6–9], в которой изменение плотности среды связано с изменением статического давления баротропным законом. В этом случае для моделирования кавитации может быть принята модель однофазной смеси, которая характеризуется переменной плотностью, изменяющейся в пределах расчетной области. Баротропный закон $\rho(p)$ используется для оценки местной плотности в зависимости от местного статического давления (рис. 2). Расчетные ячейки в этом случае рассматриваются как полностью заполненные жидкостью ($\rho = \rho_\lambda$), паром ($\rho = \rho_v$) или их смесью в зависимости от величины давления в ячейке. Плотность и динамическая вязкость смеси определяются выражениями

$$\rho = \alpha \rho_v + (1-\alpha) \rho_\lambda; \\ \mu = \alpha \mu_v + (1-\alpha) \mu_\lambda. \quad (7)$$

Индексы λ и v относятся к плотности и динамической вязкости чистой жидкости и пара. Коэффициент $\alpha = V_a/V_{\text{яч}}$ характеризует объемную долю пара в расчетной ячейке, где $V_{\text{яч}}$ — объем расчетной ячейки; V_v — объем пара в ячейке. В рассматриваемой баротропной модели зависимость $\rho(p)$ определяется из условия [7]

$$c_m^2 = \frac{dP}{d\rho}, \quad (8)$$

где c_m — скорость звука в гомогенной смеси, которая связана со скоростями звука в чистой жидкости c_λ и в паре c_v зависимостью

$$\frac{1}{c_m^2} = \left[\alpha \rho_v + (1-\alpha) \rho_\lambda \right] \left[\frac{\alpha}{\rho_v c_v^2} + \frac{1-\alpha}{\rho_\lambda c_\lambda^2} \right]. \quad (9)$$

Используя зависимость (9), в результате интегрирования уравнения (8) определяют плотность смеси в зоне изменения статического давления

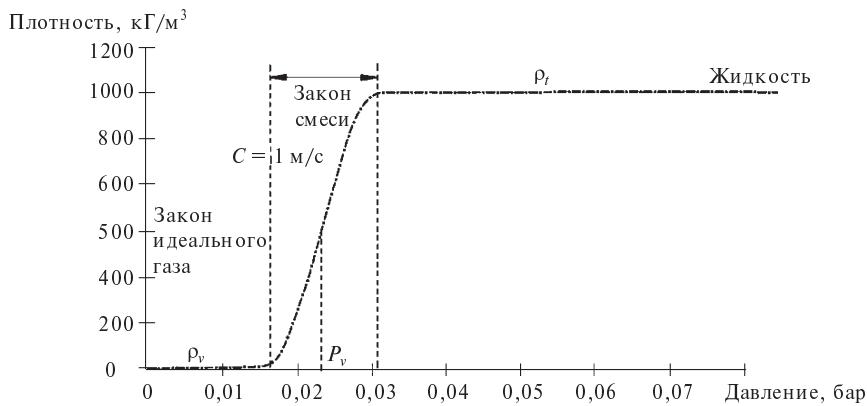


Рис. 2. Баротропный закон состояния воды
при температуре 20 °C

$\Delta p = 1400$ Па (рис. 2). В работе принималось условие, что минимальное значение скорости звука в гомогенной смеси имеет место при величине давления парообразования $p_v = 2350$ Па. Это связано с минимальной скоростью звука c_m в двухфазной однородной среде. По результатам работы [9] значение c_m находится в пределах 1 – 2 м/с. В нашей работе принято значение $c_m = 1$.

Степень развития кавитации зависит от заданной величины $P_{уст}$ давления установки. По мере уменьшения давления установки можно получить в результате расчета либо бескавитационное, либо различные стадии кавитационного трехмерного течения жидкости.

В нашей работе с помощью прикладной программы FINE TM/Turbo проведен расчет трехмерного течения вязкой жидкости в проточной части гидротурбины типа РО230 в предположении периодичности течения в направляющем аппарате и в рабочем колесе. При расчете

использовалась экономичная гексаэдральная расчетная сетка. Расчеты производились на персональном компьютере в циклической постановке, при которой в области рабочего колеса и направляющего аппарата рассматривается один межлопастной канал. Расчет производился для эталонной гидротурбины с диаметром рабочего колеса $D_1 = 1$ м при напоре $H = 1$ м. Для расчетных режимов работы турбины число Рейнольдса находится в пределах $Re = (3,4 - 3,8) \cdot 10^6$. При этом значения безразмерных величин Y^+ составляют порядка 30 при расстоянии от ближайшей точки сетки до стенки $(2,2 - 1,9) \cdot 10^{-4}$ м.

На рис. 3 показаны геометрия лопаток направляющего аппарата (при расчетном его открытии) и лопастей рабочего колеса, а также представлен фрагмент расчетной сетки (задавалось 800000 узлов расчетной сетки в области рабочего колеса и 1200000 узлов в области направляющего аппарата). Для корректного расчета

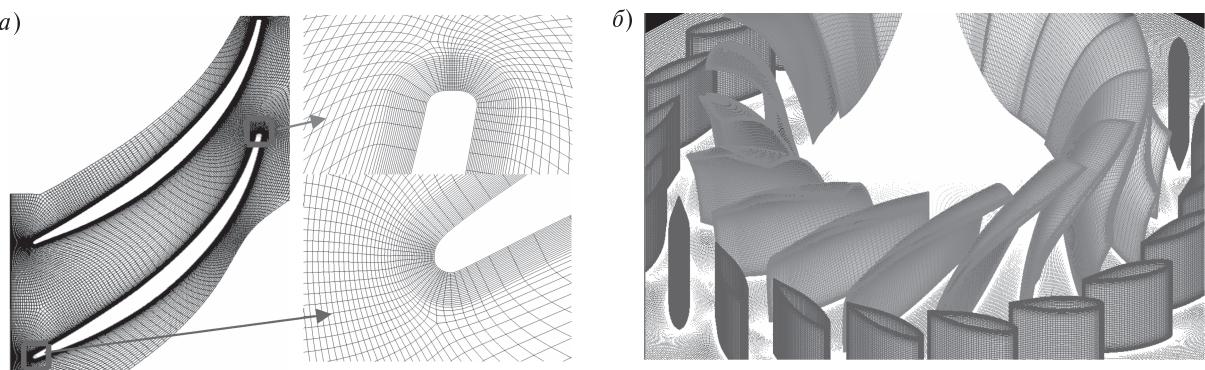


Рис. 3. Геометрия лопаток направляющего аппарата и лопастей рабочего колеса (б) гидротурбины РО230 и фрагмент расчетной сетки (а)

течения в областях с большими градиентами изменения параметров потока (в области пограничного слоя) расчетная сетка имела сгущение.

Расчет проводили для режима работы гидротурбины, близкого к оптимальному режиму. На входе в расчетную область задавали параметры потока. Масштаб турбулентности на входе задавали как одну десятую от диаметра входного сечения. Входная интенсивность турбулентности $I = 5\%$. Течение в области рабочего колеса рассчитывали во вращающейся системе координат, в остальных частях расчетной области — в неподвижной системе координат. При этом использовалась модель плоскости смещения. На всех твердых стенках ставили условие прилипания.

Необходимо также задать значение давления установки $P_{уст}$, от которого существенно зависит режим кавитационного обтекания. Для рассматриваемого режима расчеты проводили при задании нескольких значений $P_{уст}$, что позволяет определить влияние кавитации на распределение коэффициентов давления по лопасти рабочего колеса.

На рис. 4 показано распределение коэффициентов давления $C_p(s) = -P^*/P_{уст}$ по периферийному сечению лопасти рабочего колеса при задании различных значений кавитационного коэффициента установки (или давления установки $P_{уст}$). При величине $\sigma_{уст} = 0,5$ имеет место режим бес-

кавитационного обтекания данного сечения лопасти. При задании $\sigma_{уст} = 0,10$ на тыльной стороне сечения лопасти в районе выходной кромки возникает кавитационная каверна, в которой давление практически постоянно и близко к давлению парообразования. При дальнейшем уменьшении величины $\sigma_{уст} = 0,05$ область кавитационной каверны становится более развитой. При этом увеличивается отличие распределения давления по лопасти от эпюры распределения давления для случая ее бескавитационного обтекания (при $\sigma_{уст} = 0,5$).

Как отмечалось выше, определив для каждого фиксированного значения $\sigma_{уст}$ распределение давления по лопасти рабочего колеса, можно по формулам (5) и (6) найти значения крутящего момента и относительного КПД, построить расчетную «срывную» характеристику $\eta = f(\sigma_{уст})$ и определить для рассматриваемого режима значение кавитационного коэффициента турбины σ_T .

Для оценки эффективности предложенного метода были выполнены расчеты кавитационного коэффициента турбины для десяти режимов работы гидротурбины РО230, указанных в таблице. Режим работы задается значениями приведенных оборотов n_1 и приведенного расхода Q_1 . В таблице приведены также экспериментальные значения кавитационного коэффициента турби-

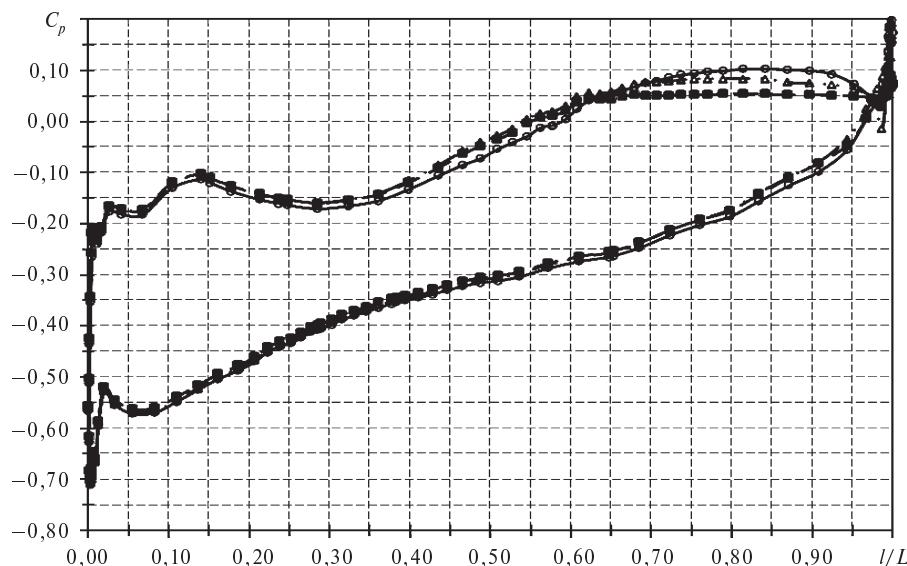


Рис. 4. Распределения $C_p(s)$ по периферийному сечению лопасти рабочего колеса РО230 при различных значениях $\sigma_{уст}$
 (—●— $\sigma = 0,5$; —▲— $\sigma = 0,1$; —■— $\sigma = 0,05$)



Расчетные и экспериментальные значения σ_t

Номер режима	Задаваемые параметры режима		Расчетные и экспериментальные значения кавитационного коэффициента турбины		
	Приведенные обороты n_1 , об/мин	Приведенный расход Q_1 , м ³ /с	$\sigma_{\text{расч}}$	$\sigma_{\text{эксп}}$	$\sigma_{l\text{эксп}}$
1	65,3	0,398	0,034	0,031	0,031
2	65,3	0,471	0,050	0,047	0,047
3	65,3	0,531	0,048	0,047	0,048
4	65,3	0,581	0,044	0,041	0,050
5	69,4	0,464	0,0385	0,0365	0,0365
6	69,4	0,528	0,0488	0,0465	0,0465
7	69,4	0,578	0,042	0,039	0,051
8	73,7	0,456	0,0336	0,0313	0,033
9	73,7	0,523	0,0475	0,046	0,046
10	73,7	0,577	0,045	0,047	0,050

ны, полученные в результате кавитационных испытаний этой гидротурбины в лаборатории водяных турбин ЛМЗ. Расчетные ($\sigma_{\text{расч}}$) и экспериментальные ($\sigma_{\text{эксп}}$) значения кавитационного коэффициента турбины найдены в соответствии с рекомендацией МЭК из условия падения КПД гидротурбины на 1 % по сравнению с КПД при бескавитационном обтекании рабочего колеса на рассматриваемом режиме.

Для всех рассмотренных режимов отличие расчетных и экспериментальных значений кавитационных коэффициентов турбины находится в пределах 3–8 %.

На рис. 5–7 показаны расчетные и экспериментальные «срывные» характеристики для трех

режимов работы гидротурбины РО230 (режимы 5, 6, 7, см. табл.). Следует отметить, что «срывные» характеристики могут иметь различный вид. В частности, при уменьшении $\sigma_{\text{уст}}$ значение КПД гидротурбины может либо монотонно падать по сравнению с бескавитационном режимом (рис. 5), либо сначала увеличивается до некоторого максимального значения, а потом резко уменьшается (рис. 7).

В таблице приведены значения кавитационного коэффициента $\sigma_{l\text{эксп}}$, найденные по экспериментальным «срывным» характеристикам из условия падения КПД гидротурбины на 1 % по сравнению с максимальным значением КПД на этой характеристике. Видно, что в этом слу-

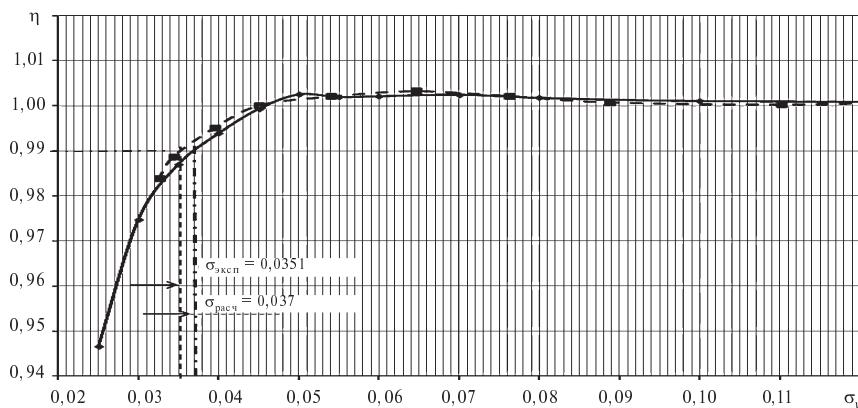


Рис. 5. Расчетная (—■—) и экспериментальная (—●—) «срывные» характеристики, режим 5 (см. табл.)

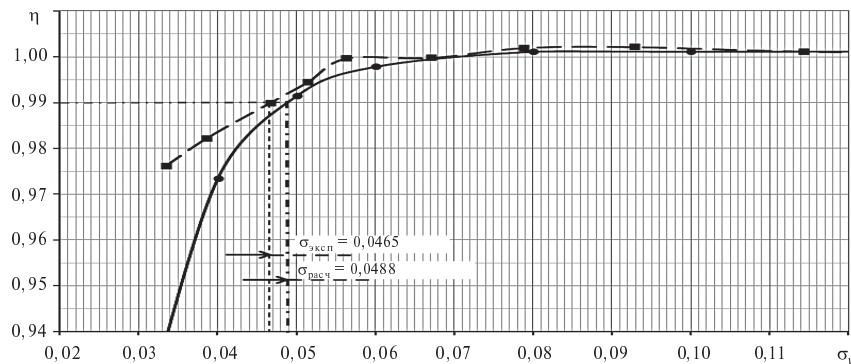


Рис. 6. Расчетная (—■—) и экспериментальная (—●—) «срывные» характеристики, режим 6 (см. табл.)

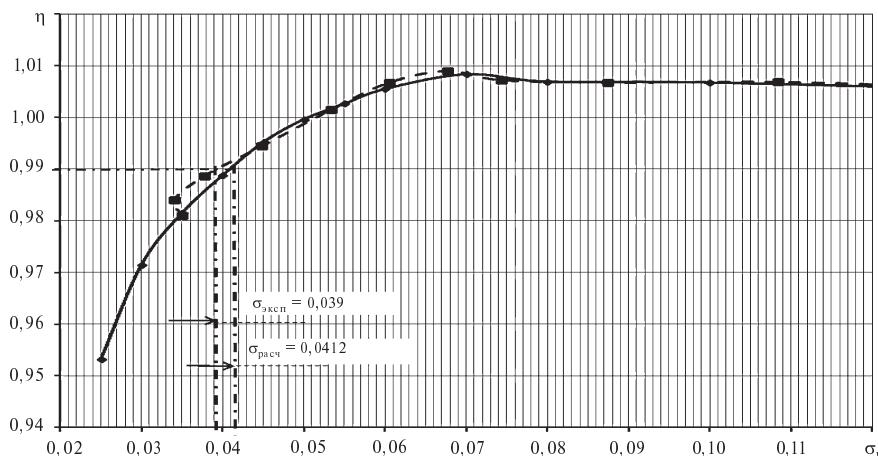


Рис. 7. Расчетная (—■—) и экспериментальная (—●—) «срывные» характеристики, режим 7 (см. табл.)

чае для величин σ_1 эксп (в отличие от значений σ эксп) наблюдается характерное для гидротурбин увеличение кавитационного коэффициента турбины с увеличением приведенного расхода.

Выполненные расчетные исследования показали, что предложенная методика позволяет эффективно и с достаточной точностью определить кавитационные показатели гидротурбины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Модельные испытания гидротурбин [Текст] / Под ред. В.М. Малышева.— Л., 1971.
2. **Перник, А.Д.** Проблемы кавитации [Текст] / А.Д. Перник.— Госуд. союз. изд-во судостр. пром., 1963.— 335 с.
3. **Рождественский, В.В.** Кавитация [Текст] / В.В. Рождественский.— Л.: Изд-во судостроения, 1977.— 247 с.
4. **Топаж, Г.И.** Расчет интегральных гидравлических показателей гидромашин [Текст] / Г.И. Топаж.— Л.: Изд-во ЛГУ, 1989.— 203с.
5. **Румахеранг, В.М.** Расчет кавитационного обтекания рабочего колеса радиально-осевой гидротурбины [Текст] / В.М. Румахеранг, Г.И. Топаж // Известия Самарского научного центра РАН.— 2011. Т. 13, № 1(2).
6. Theoretical Manual FINE™/Turbo [Текст] // Flow Integrated Environment.— September, 2009.— Vol. 8.7.
7. **Delannoy, Y.** Two phase flow approach in unsteady cavitation modeling [Текст] / Y. Delannoy, J.L. Kueny // ASME Cavitation and Multi-phase Flow Forum.— 1990.— Vol. 109.— P. 153–159.
8. **Coutier-Delgosha, O.** Numerical simulation of cavitating flow in an inducer geometry [Текст] / O. Coutier-Delgosha, R. Fortes-Patella, JL. Reboud, N. Hakimi // Proc. 4th European Conference on Turbomachinery.— Firenze, Italy.— March 2001.
9. **Reboud, J.L.** Numerical simulation of unsteady cavitating flows: some applications and open problems [Текст] / J.L. Reboud, O. Coutier-Delgosha, B. Fauffray, R. Fortes-Patella // Fifth International Symposium on Cavitation (CAV2003).— Osaka, Japan.— November 1–4, 2003.



УДК 621.165

*В.А. Рассохин, Н.А. Забелин,
Ю.В. Матвеев, И.С. Харисов*

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СТУПЕНЕЙ ТУРБОУСТАНОВОК МАЛОЙ МОЩНОСТИ НА СТЕНДАХ СПбГПУ

За рубежом в различных областях автономной энергетики разработаны и широко используются газотурбинные установки мощностью от нескольких десятков до нескольких сотен киловатт. В Российской Федерации в настоящее время отсутствует серийное производство аналогичных установок, а лишь проводится рядом организаций разработка и изготовление отдельных промышленных образцов.

В отечественной энергетике используются зарубежные установки указанного диапазона мощностей (Honeywell, Elliot, Capstone(США), а также Turbec(Volvo Aero Швеция)), но они имеют очень высокую стоимость, которая составляет 1200–1500 долларов за киловатт [1, 2].

Поэтому разработка и создание подобных установок для российской энергетики чрезвычайно актуальны.

Эти установки нашли бы широкое использование в отечественной энергетике в качестве автономных источников для децентрализованного обеспечения электрической и тепловой энергией различных потребителей.

В последние годы Санкт-Петербургский государственный политехнический университет совместно с Научно-техническим центром «Микротурбинные технологии» и АО «Трансгаз

Санкт-Петербург» разработал серию малогабаритных установок с электрической мощностью от 20 до 500 кВт и электрическим КПД не менее 30 % [3].

Единичные образцы разработанных установок изготовлены и проходят в настоящее время стендовые и промышленные испытания. Мощностной ряд этих установок приводится в таблице.

В данной статье представлена методика экспериментальных исследований, уже выполненных и проводимых в настоящее время на стендах СПбГПУ с целью проверки работоспособности установок и соответствия выдаваемых параметров значениям, которые определены расчетным методом.

Объекты исследования

Экспериментальные установки для исследования характеристик турбин в основном состоят из турбины и нагрузочного устройства балансирного исполнения. В установках мощностью до 1 МВт рабочие колеса исследуемых турбин и врачающиеся элементы тормозного устройства монтируются на одном валу.

В СПбГПУ были разработаны и исследованы конструкции сопловых аппаратов с малыми углами выхода потока. Аналоги подобных исследований и разработок, принадлежащих другим

Показатели отечественных микротурбинных установок, разработанных с участием СПбГПУ

Название	Номинальная электрическая мощность, кВт	Давление газа на входе в турбину, МПа	КПД установки	Скорость вращения, об/мин	Ресурс, лет
Микротурбогенератор МДГ-20	20	1,5	35	36000	20
Микротурбинный генератор МТГ-100	100	0,38	не менее 31	60000	20
Микропартурбинный генератор МПГ-500	500	3	не менее 31	20000	20

авторам, отсутствуют в отечественной и зарубежной печати. В эксперименте использовались малые углы выхода потока из соплового аппарата (СА) с малыми углами входа потока в рабочее колесо (РК), $\beta_1 < 10^\circ$. Были исследованы профили ЛПИ с большим относительным шагом t/B и специальным построением межлопаточных каналов лопаток осевого, центробежного, центро斯特ремительного рабочего колеса и безлопаточный СА.

Основные элементы исследуемой установки обсуждаются далее.

Методика исследования

Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на рис. 3.

Расход воздуха определяется при помощи нормальной стандартной диафрагмы и измеряемых параметров воздуха. Для обеспечения возможности определения расходов в широком диапазоне изменения начальных параметров и пропускной способности турбинных ступеней используется набор сменных диафрагм, выполненных по ГОСТ 8.586.2–2005. Дроссельное устройство обеспечивает соосность диафрагмы с трубами калиброванного мерного участка и формирует камеры отбора давлений перед и за диафрагмой. Камеры дренированы для определения перепада давлений на шайбе и давления на входе в диафрагму. Температура рабочего тела измеряется при помощи стандартной хромель-копелевой термопары, установленной в первой камере дроссельного устройства.

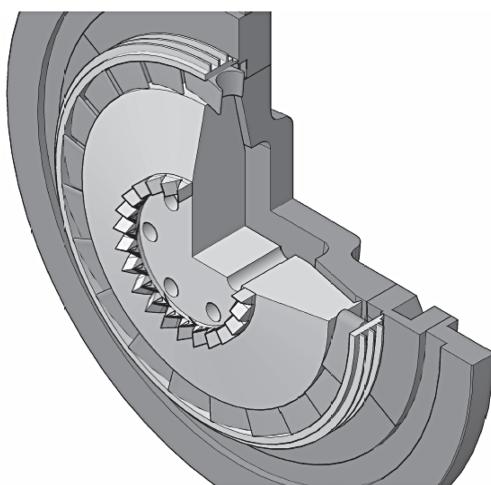


Рис. 1. Рабочее колесо осевой турбины

Давление p_0^* торможения на входе в турбинную ступень измеряется с помощью четырех трубок полного напора, расположенных по окружности среднего диаметра входа в СА.

Статическое давление p_1 в зазоре между СА и РК измеряется у корня, в центре и на периферии ступени посредством отбора через отверстия, расположенные по шагу соплового аппарата.

Статическое давление p_2 за ступенью изменяется через четыре дренажных отверстия, равнорасположенных на расстоянии шага по окружностям корневого и периферийного диаметров ступени. Указанные отверстия выполнены на расстоянии 6 мм от выходных кромок рабочих лопаток в диффузоре (в ступенях с диффузором) и в моментомере (при опытах с измерением момента количества движения потока за РК).

Давление за диффузором и за моментомером в опытах без диффузора принимается равным барометрическому.

Все отборы давлений выведены на преобразователи, установленные на пульте управления, с визуализацией измеряемых величин в МПа.

Температура торможения T_0^* измеряется во входном патрубке турбины при помощи хромель-копелевой термопары, ЭДС которой измеряется и преобразуется в градусы Цельсия.

Частота вращения ротора определяется оптическим датчиком, измерение ведется непосредственно в об/мин. Датчик установлен на покачивающемся корпусе индукторного тормоза напротив торцевой части ротора.

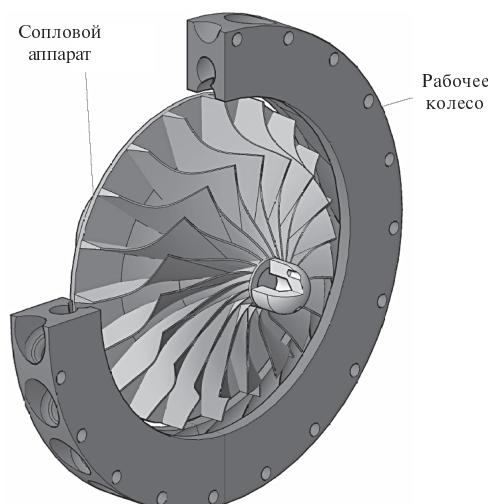


Рис. 2. Ступень центро斯特ремительной турбины



Сила, возникающая на рычагах покачивающегося корпуса тормоза и моментомера, измеряется с помощью датчиков силы, сигналы с которых поступают на частотомеры, расположенные на пульте управления.

В качестве первичных приборов используются:

для измерения расхода — стандартная диафрагма;

для измерения полного давления — трубы Пито;

для измерения температур — хромель-копелевые термопары;

для измерения частоты вращения — оптический датчик;

для измерения усилий — датчики силы;

для измерения статического давления — дренажные отверстия.

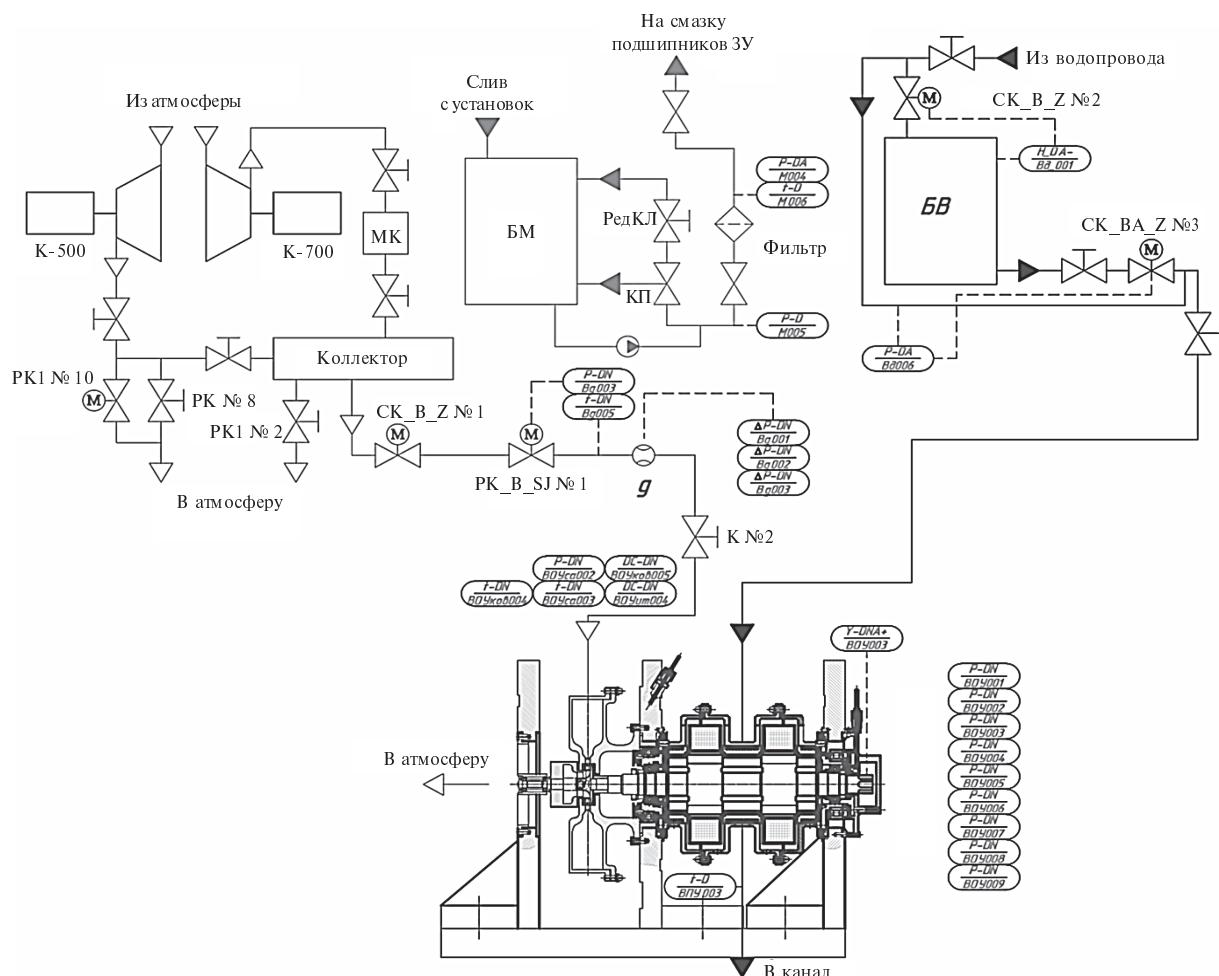


Рис. 3. Принципиальная схема экспериментального стенда

Обозначения: исследуемые объекты: Т — турбина; СА — сопловой аппарат; системы и устройства: г — измерения расхода; М — масляная; В — воздушная; Вд — водяная; ит — индукторный тормоз; ков — колесо с осевым выходом; защита: СК — стопорный клапан; КП — клапан предохранительный; регулирование: ВУ — выпрямительное устройство; РК — регулирующий клапан; по месту: ЩУ — щит управления; БМ — бак масла; БВ — бак воды; по назначению: SJ — регулирование; А — сигнализация; Z — защита; D — сигнал на ЭВМ; N — запись измеряемых параметров в память ПК по команде; датчики: ДС — датчик усилий; Н — концевой выключатель; Y — частота вращения; t — температура; Р — давление; ΔP — перепад давлений;

- барометрическое давление;
- температура атмосферного воздуха;
- выпрямительное устройство с тонкой регулировкой постоянного тока;
- командная кнопка записи экспериментальных данных;
- кнопка аварийного останова

Обработка опытных данных

Для определения показателей, характеризующих совершенство проточных частей исследуемых объектов, и суммарных внешних характеристик ступеней разработаны методики обработки экспериментальных данных. Обработка экспериментальных данных выполняется на ПК, подключенном к пульту управления, в системе Master SCADA в режиме реального времени.

Осреднение потоков в элементах малорасходных турбин

Очевидная неравномерность течения рабочего тела в элементах турбоустановки оказывает существенное влияние на эффективность энергопреобразования и на точность определения характеристик исследуемых элементов.

Получение характеристик потока при осреднении результатов траверсирования связано с многократными измерениями параметров потока в исследуемых сечениях и дальнейшей аналитической обработкой результатов. Таким образом, на погрешность измерений накладывается погрешность вычислений, обусловленная выбором метода осреднения.

Вследствие небольших объемных расходов кольцевые решетки малоразмерных турбин имеют малую высоту лопаток. Кроме того, углы выхода потока из сопел малы, число сопел невелико и сопла расположены на окружности малого диаметра (косые срезы сопел имеют сильную кривизну в окружном направлении либо эллиптичность у осесимметричных сопел). Вследствие этого поток рабочего тела на выходе из направляющего аппарата малоразмерной ступени представляет собой систему струй, которые не образуют осесимметричного кольцевого течения, что

приводит к сильной неравномерности течения как по высоте, так и по шагу.

При исследовании малоразмерных устройств часто невозможно поместить приборы в контрольное сечение. Измерительные приборы могут вносить существенные возмущения в поток из-за относительно больших размеров, сравнимых с критериальными величинами исследуемого объекта, что приводит к недопустимым погрешностям.

В таких случаях более точным и часто единственным способом получения достоверных интегральных характеристик потока является осреднение с помощью суммирующих приспособлений, измеряющих момент количества движения потока рабочего тела, — моментометров. Кроме того, спрямляющая решетка моментометра частично моделирует лопаточный аппарат рабочего колеса. Это особенно важно для сверхзвуковой ступени, так как известно, что рабочая решетка в сверхзвуковом потоке обладает направляющим действием.

Подводя итоги изложенному, можно утверждать:

1. В результате совместной работы СПбГПУ, ООО «НТЦ МТТ» и ООО «Газпромтрансгаз Санкт-Петербург» разработаны, созданы, находятся в экспериментальных исследованиях на стендах СПбГПУ и проходят опытно-промышленную эксплуатацию перспективные отечественные установки малой мощности, имеющие технические характеристики на уровне зарубежных установок аналогичной мощности.

2. Разработанные методики проведения экспериментальных исследований позволяют с достаточной точностью определять основные характеристики испытываемых образцов установок малой мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рассохин, В.А. Методы экспериментальных исследований высокооборотных турбоустановок [Текст] / В.А. Рассохин, С.Г. Раков // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.— С. 54–56.

2. Беседин, С.Н. Разработка и создание микротурбинного генератора электрической мощностью 100 кВт (МТГ-100) [Текст] / С.Н. Беседин // Изобретатели и инновационная политика России: Матер. Всеросс. форума / Под ред. Ю.Г. Попова

и А.Г. Семенова.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.— С. 80–84.

3. Беседин, С.Н. Разработка и создание автономных энергетических установок малой мощности на базе газотурбинного цикла простой схемы с сильно развитой системой регенерации тепла [Текст] / С.Н. Беседин, Н.А. Забелин, В.А. Рассохин, Т.А. Фокин [и др.] // Инновационная политика и изобретатели (Россия— начало XXI века).— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.— С. 58–61



МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 629.1.032.001

В.Б. Шеломов, Р.Ю. Добрецов

УТОЧНЕНИЕ МОДЕЛИ ПОВОРОТА ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ

В теории гусеничных машин (ГМ) боковые силы сопротивления повороту принято полагать пропорциональными нормальной нагрузке на опорную поверхность гусеницы. Коэффициент пропорциональности μ называется коэффициентом сопротивления повороту [1]. Принятая в теории ГМ формула, нередко называемая «формулой Никитина», позволяет получить расчетные значения μ в зависимости от радиуса поворота. Одна из форм записи имеет вид

$$\mu = \frac{\mu_{\max}}{0,925 + 0,15 R/B}. \quad (1)$$

Здесь μ_{\max} — «максимальное» значение коэффициента сопротивления повороту, определяемое в экспериментах коллектива А.О. Никитина при повороте ГМ посредством торможения гусеницы отстяжного борта; R — радиус поворота как расстояние от центра поворота до центра тяжести ГМ; B — ширина колеи ГМ. Формула выведена в результате серии экспериментов при криволинейном движении ГМ с небольшой скоростью.

Известно, что значение μ зависит от физико-механических свойств грунта (подробно этот вопрос рассмотрен в книге [2]), геометрических характеристик движителя, радиуса поворота. Текущее значение μ определяется величинами сопротивления срезу, сдвигу грунта, трением скольжения слоев сдвигаемого грунта, трением скольжения трака о поверхность грунта, сопротивлением перемещению грунтового валика (для связанных грунтов) и т. д. При этом коэффициент сопротивления повороту μ , найденный по (1) для поворота с радиусом меньшим, чем $B/2$, превышает μ_{\max} , приближаясь к величине коэффициента бокового сдвига. Кроме того, в движении с частичным заносом ГМ, когда все точки по-

верхности гусеничного движителя скользят от центра поворота, коэффициент сопротивления повороту неопределим.

Поставим вопрос об определении коэффициента сопротивления в общем случае статического криволинейного движения ГМ следующим образом. В общем случае центр поворота ГМ определяется относительно ГМ поперечной координатой R и продольной координатой χ . Полный занос машины ($\chi = \infty$) рассматривается как частный случай поворота. Не делается различия между максимальным коэффициентом сопротивления повороту и коэффициентом сопротивления боковому сдвигу.

Формула (1) устанавливает зависимость μ от величины радиуса поворота R . Заметим, что здесь радиус R по своему физическому смыслу является не столько характеристикой траектории движения, сколько характеристикой соотношения X/Y продольного перемещения машины и среднего бокового скольжения опорной ветви гусеницы по грунту (рис. 1, а). Принимая Y как среднеинтегральную по длине L опорной поверхности гусеничного движителя (базы) величину бокового скольжения, имеем

$$R = \frac{X}{Y} \frac{L}{4}. \quad (2)$$

Соотношение X/Y (в правой части (2)) оказывает решающее влияние на сопротивление повороту. Оно отражает долю «движения без сопротивления повороту» и долю «движения с максимальным сопротивлением повороту». Именно эти два движения и совершают машина в повороте, двигаясь поступательно и одновременно вращаясь относительно центра поворота на некоторый угол φ . Так, при $Y=0$ ($R=\infty$) сопротивление повороту отсутствует; при $X=0$ ($R=0$) сопротивление повороту максимально. При других

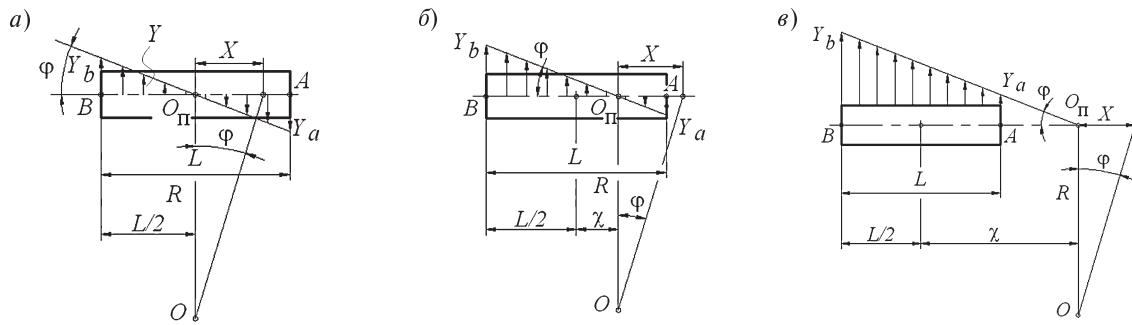


Рис. 1. Эпюры боковых скольжений опорной ветви гусеницы при повороте:

a — без продольного и поперечного смещения полюсов поворота гусениц; *б* — без заноса; *в* — с частичным заносом

соотношениях X/Y коэффициент сопротивления повороту находится в интервале $\mu_{\max} - 0$.

Однако рассматриваемое соотношение зависит не только от радиуса поворота, но и от второй координаты центра поворота — от его продольного смещения c (рис. 1, *б*).

При сформулированной постановке вопроса выражение коэффициента сопротивления повороту следует представить в виде

$$\mu = \frac{\mu_{\max}}{1 + 0,15 R_c / B}. \quad (3)$$

Здесь R_c — функция от R и χ , отражающая соотношение X/Y . Несомненно, функция R_c должна при $\chi = 0$ тождественно совпадать с радиусом R , а при полном заносе ($\chi = \infty$) быть таковой, что величина μ достигает максимума μ_{\max} (3). Замена коэффициента 0,925 формулы (1) на коэффициент 1 позволяет выделить рассмотрение эффекта бокового скольжения в составе аппроксимации изменения бокового сопротивления повороту машины.

Формула (1) — базовая при выводе основных положений теории движения транспортных ГМ. Поэтому уточнение (3) физического смысла самого коэффициента сопротивления повороту и составляющих «формулы Никитина» носит для теории ГМ принципиальный характер. Предлагаемые далее по этому поводу теоретические выводы носят характер гипотезы. Безусловно, для практического применения они должны быть подтверждены экспериментально так, как это было сделано для (1).

В основе дальнейших выкладок лежат следующие допущения (обычные для этого раздела теории ГМ): центр тяжести ГМ совпадает

с геометрическим центром шасси; отсутствуют юз и буксование гусениц; поворот равномерный, на горизонтальной поверхности; боковые реакции под гусеницами пропорциональны вертикальной нагрузке. При отсутствии внешних сил эпюра нормального давления на грунт — прямоугольная. В случае отсутствия внешних сил, продольных и поперечных, полюса поворота находятся в геометрических центрах опорных поверхностей, на поперечной оси машины (рис. 1, *а*).

В формуле (3) R_c представляется комплексом тех же величин, что и радиус поворота (2), но уже при условии $\chi \neq 0$:

$$R_c = \frac{X}{Y} \frac{L}{4}; \quad \chi \neq 0. \quad (4)$$

Поиск выражения правой части (4) с координатами центра поворота R и χ требует рассмотрения двух случаев. Первый случай (рис. 1, *б*) — когда продольное смещение центра поворота не выходит за пределы машины ($\chi < L/2$).

Подобие прямоугольных треугольников χ острым углом ϕ в одной из вершин позволяет записать следующие пропорции катетов:

$$\frac{X}{R} = \frac{Y_b}{L/2 + \chi} = \frac{Y_a}{L/2 - \chi},$$

где Y_a и Y_b — величины поперечного скольжения для точек *A* и *B* на краях опорной поверхности.

Среднеинтегральная величина бокового (поперечного) скольжения, отнесенная к базе L , равна

$$Y = \frac{S_{\Delta 1} + S_{\Delta 2}}{L};$$

$$Y = \frac{1}{2} \frac{Y_b(L/2 + \chi) + Y_a(L/2 - \chi)}{L};$$

$$Y = \frac{XL}{4R} \left[1 + 4\chi_0^2 \right].$$

Здесь использованы обозначения: $S_{\Delta 1}$ и $S_{\Delta 2}$ — площади треугольников, построенных на катетах $BO_{\text{п}}$ и $O_{\text{п}}A$ (см. рис. 1, б), $\chi_0 = \chi/L$ — относительное продольное смещение центра поворота ГМ. Учтены выражения Y_a и Y_b из приведенной выше пропорции.

Отсюда следует выражение правой части (4) для случая $\chi < L/2$:

$$R_\chi = \frac{R}{4\chi_0^2 + 1}. \quad (5)$$

Следует отметить, что при $\chi_0 \rightarrow 0$ функция $R_\chi \rightarrow R$, что соответствует частному случаю отсутствия продольного смещения полюсов поворота гусениц.

Второй случай — когда $\chi \geq L/2$ (рис. 1, в) — называют [1] частичным заносом машины, так как боковое скольжение всех точек опорной поверхности происходит в одну сторону.

Пропорции катетов подобных треугольников в данном случае таковы:

$$\frac{X}{R} = \frac{Y_b}{L/2 + \chi} = \frac{Y_a}{\chi - L/2}.$$

Среднеинтегральная величина бокового скольжения, отнесенная к базе L , с учетом составленных пропорций равна

$$Y = \frac{S_{\text{трап}}}{L}; \quad Y = \frac{L[Y_a + Y_b]}{2L}; \quad Y = \frac{XL}{R4} 4\chi_0.$$

Здесь $S_{\text{трап}}$ означает площадь трапеции — эпюры «боковых скольжений» (см. рис. 1, в), имеющей высоту $AB = L$.

Выражение функции R_χ при подстановке Y в правую часть (4) принимает вид

$$R_\chi = \frac{R}{4|\chi_0|}. \quad (6)$$

Расчетная схема (рис. 1, в) к частному случаю $\chi_0 = 0$ сведена быть не может. Примечательно, что на границе ($\chi_0 = 0,5$) областей определения (5) и (6) совпадают не только величины (5) и (6), но и величины производных $\partial R_\chi / \partial \chi_0$.

Здесь важно то, что в случае частичного заноса возможно определение по формулам (3), (6) коэффициента сопротивления повороту. Кроме

того, коэффициент сопротивления при движении в полном заносе ($\chi = \infty$) максимален и равен согласно (3), (6) μ_{\max} .

Интересно рассмотреть случай, когда продольное смещение полюсов поворота выходит за пределы опорной поверхности движителя. Такое смещение возможно лишь под действием внешней силы, природа которой может быть различна: это либо сила на крюке, либо скатывающая сила на косогоре, но чаще — центробежная сила при движении на большой скорости. При выходе продольного смещения за пределы опорной поверхности поперечная составляющая внешней силы P_y уравновешивается со стороны грунта силой сопротивления боковому скольжению, распределенной по одной стороне опорной поверхности движителя:

$$\mu Z = |P_y|.$$

Вопрос о продольном смещении центра поворота решается заменой в выражениях (3) и (6) коэффициента сопротивления повороту μ в предыдущем выражении. После алгебраических преобразований имеем

$$\chi_0 = \frac{\pm 0,15\rho}{4 \left(\frac{Z \mu_{\max}}{|P_y|} - 1 \right)}. \quad (7)$$

Знак χ_0 зависит от направления действия поперечной составляющей внешней силы: положительная величина принимается в случае направления поперечной составляющей к центру поворота.

С выходом полюсов поворота за пределы опорной поверхности гусеничного движителя прекращается зависимость продольного смещения полюсов поворота от продольного смещения центра давления.

В рассматриваемом случае все точки опорной поверхности гусеничного движителя скользят в одном направлении: в направлении от центра поворота, если полюса поворота располагаются впереди машины ($\chi_0 < -0,5$, частичный занос), или в направлении к центру поворота, если полюса поворота располагаются сзади по ходу движения машины ($\chi_0 > 0,5$).

Когда поперечная составляющая P_y внешней силы по абсолютной величине приближается

к максимальному значению силы сопротивления боковому скольжению $\mu_{\max} Z$, грунт перестает удерживать машину, равновесие сил нарушается, и центр поворота бесконечно удаляется. Такое явление называется полным заносом машины.

В распространенном частном случае криволинейного движения ГМ на большой скорости составляющая центробежной силы вдоль попечерной оси машины определяется массой и скоростью движения:

$$P_y = \frac{GV^2}{gR}, \quad (8)$$

где g — ускорение свободного падения.

Выражение (7) с учетом (8) позволяет выразить радиус поворота, при котором начинается частичный занос. Поскольку условием частичного заноса является равенство $|\chi_0| = 0,5$, а правой части рассматриваемого выражения (7) присваивается знак минус, выражение для радиуса поворота, при движении с которым начинается частичный занос, имеет вид

$$R = \frac{V^2}{g\mu_{\max} - \frac{0,15V^2}{2B}}. \quad (9)$$

Полный занос гусеничной машины наступает при таком малом радиусе поворота, при котором поперечная составляющая центробежной силы сравнивается с максимальной величиной силы сопротивления боковому скольжению $\mu_{\max} G$. С учетом (8) условие отсутствия полного заноса при движении гусеничной машины со скоростью V имеет вид

$$R > \frac{V^2}{g\mu_{\max}}. \quad (10)$$

Рассмотрим пример. Гусеничная машина характеризуется следующими техническими данными: масса $m = 40$ т; длина опорной поверхности $L = 4,2$ м; ширина колеи $B = 2,8$ м; отношение радиуса ведущего колеса к КПД ходовой части принимается (в первом приближении) постоянным $r_{\text{вх}}/\eta = 0,4$; высота центра тяжести $h = 1$ м. Грунт имеет следующие характеристики: $f = 0,1$; $\mu_{\max} = 1$. Ускорение свободного падения $g = 9,8$ м/с².

Определим основные характеристики движения при различных радиусах поворота:

продольное смещение χ_0 полюсов поворота (7) с учетом режима движения ГМ (8) и (9);

силы тяги — P_1 на отстающем и P_2 на забегающем бортах гусеничной машины,

Силы тяги отстающего и забегающего бортов

R , м	χ_0	P_1 , кН	P_2 , кН	Q_1 , кН	Q_2 , кН
900	-0,22	17	22	16	23
600	-0,22	15	24	14	25
400	-0,23	13	26	12	27
200	-0,24	7	32	4	35
100	-0,26	-2	42	-8	48
60	-0,28	-12	52	-23	62
40	-0,31	-18	61	-38	77
20	-0,41	-13	69	-70	109
17	-0,44	-5	70	-78	117
16	-0,46	-1	70	-81	120
15	-0,48	5	70	-84	123
14	-0,50	11	71	-87	127
13	-0,63	11	91	-96	135
12	-0,91	11	135	-105	145



$$P_1 = f Z_1 - \frac{M_c}{B} + F_y \chi_0 L \left(-\frac{1}{2R} - \frac{1}{B} \right);$$

$$P_2 = f Z_2 + \frac{M_c}{B} + F_y \chi_0 L \left(-\frac{1}{2R} + \frac{1}{B} \right); \quad (11)$$

соответствующие силы тяги Q_1 и Q_2 при движении с малой скоростью (т. е. в зависимости (11) полагаем $\chi_0 = 0$), определенные для сравнения.

Расчет коэффициента сопротивления повороту μ произведен на основе гипотезы (3).

По результатам расчета (см. таблицу и рис. 2) видно, что наибольшую разгрузку при движении с повышенной скоростью получает отстающий борт. Сила тяги забегающего борта, уменьшенная на больших радиусах поворота, быстро достигает предела по сцеплению при движении, близком к полному заносу.

При движении с радиусом поворота $R = 14$ м начинается согласно (9) частичный занос гусеничной машины. Дальнейшее уменьшение радиуса поворота увеличивает продольное смещение полюсов поворота χ так, что при радиусе поворота, меньшем $R = 11,3$ м, возрастающая продольная составляющая P_x центробежной силы отрывается переднюю кромку опорной поверхности гусеничного движителя вверх. Имеется в виду связь между продольной и поперечной состав-

ляющими центробежной силы: $P_x = -P_y \frac{\chi}{R}$.

Таким образом, дальнейший расчет с меньшими радиусами по предложенной модели движения невозможен. Тем не менее, в любом случае при движении с радиусом поворота $R = 10,2$ м происходит в соответствии с (10) полный занос машины. Полный занос предотвращает опрокидывание машины, которое возможно при движении с радиусом поворота $R = 7,3$ м.

Предложенная математическая модель поворота, использующая базовые положения тео-

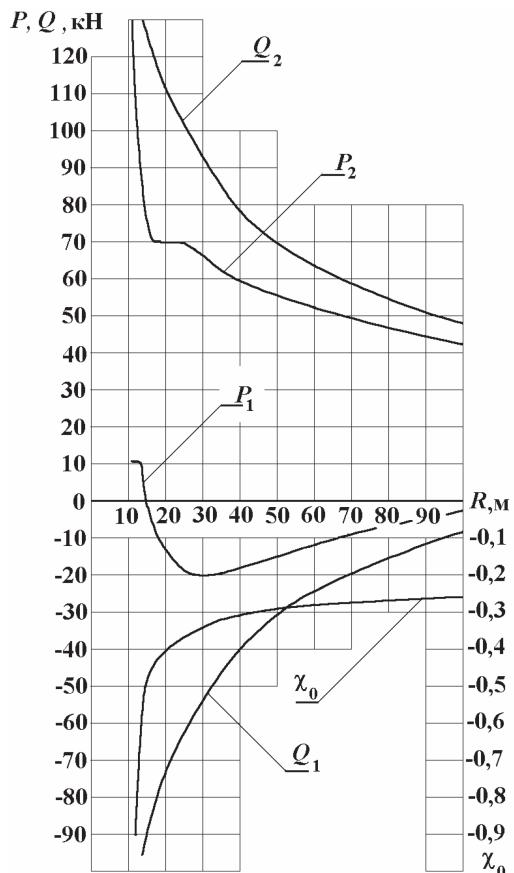


Рис. 2. Характеристики движения гусеничной машины на скорости 10 м/с и на малой скорости движения

рии гусеничных машин, позволяет охватить явление частичного и полного заноса гусеничной машины.

Предлагаемые выражения коэффициента сопротивления повороту через радиус поворота и продольное смещение центра поворота носят характер гипотезы. В двух точках данная гипотеза имеет экспериментальное подтверждение. Имеется в виду движение в повороте с любым радиусом R при, во-первых, $\chi = 0$, во-вторых, при $\chi = \infty$ и $\mu = \mu_{\max}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Забавников, Н.А., Основы теории транспортных гусеничных машин [Текст] / Н.А. Забавников.— М.: Машиностроение, 1975.— 448 с.
- Теория и конструкция танка. Т. 8. Параметры внешней среды, используемые при расчете танков [Текст] / Под. ред. В.А. Развалова.— М.: Машиностроение, 1987.

УДК 621.882.219.4:539.42

Т.А. Дудник, И.А. Богоев

О НОРМИРОВАНИИ РАСЧЕТОВ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ХРУПКУЮ ПРОЧНОСТЬ

Крупногабаритные резьбовые соединения применяются в ответственных узлах различных энергетических установок и машин, во многом определяя безопасность и надежность их работы. Несмотря на успехи, достигнутые в прикладной механике разрушения, у нас и за рубежом отсутствуют нормы расчета на хрупкую прочность для высоконагруженных крепежных деталей энергетических установок. Это обстоятельство определяет целесообразность разработки предложений по расчетам резьбовых соединений на хрупкую прочность.

Для разработки методики поверочных расчетов резьбовых соединений энергетических установок на хрупкую прочность требуется оценка теоретических коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) в их рабочих витках с учетом особенностей конструкции.

Экспериментальные данные, полученные нами ранее [1], показывают (рис. 1), что оценка

сопротивления хрупкому разрушению шпилек должна выполняться с учетом КИН K_I в шпильке для соединения «шпилька—гайка», где значение K_I выше, чем в соединении «шпилька—корпус», при этом в расчет должны быть взяты данные для трещины, которая нормальна к действию осевой нагрузки.

На рис. 2 приведены графики зависимостей $K_I = f(l)$ для нормальной трещины в шпильке М170 резьбового соединения «шпилька—гайка», пересчитанных на нагрузку 6 МН по формуле [2]

$$K_H = K_M \frac{\sigma_H}{\sigma_M} \left(\frac{l_H}{l_M} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где σ_H , σ_M — напряжения в сходственных точках соответственно натуры и модели; l_H/l_M — отношение длины сходственных отрезков натуры и модели (масштаб моделирования); K_H и K_M — КИН соответственно натуры и модели.

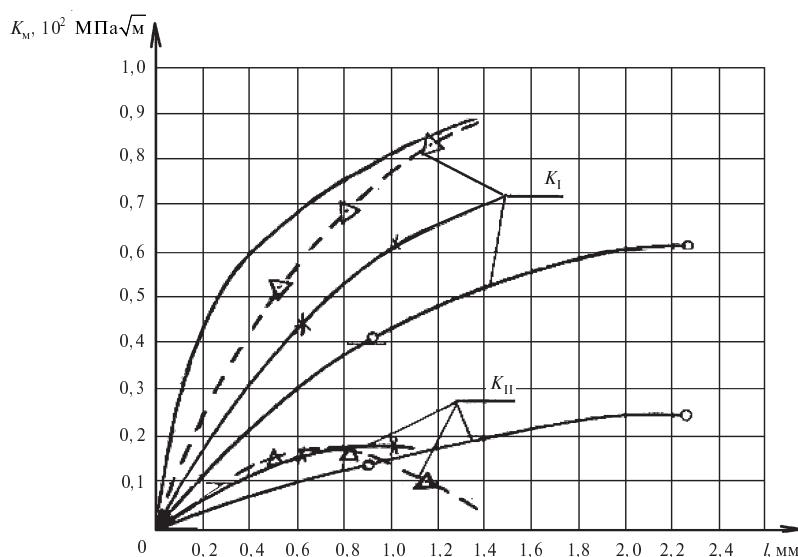


Рис. 1. Зависимости КИН от глубины трещин в объемных моделях резьбовых соединений:

- в шпильке соединения «шпилька—гайка», нормальная трещина;
- $\triangle-\triangle-\triangle$ — в шпильке соединения «шпилька—гайка»;
- $\times-\times-\times$ — в шпильке на 1-м витке; $\circ-\circ-\circ$ — в корпусе на 30-м витке соединения «шпилька—корпус»

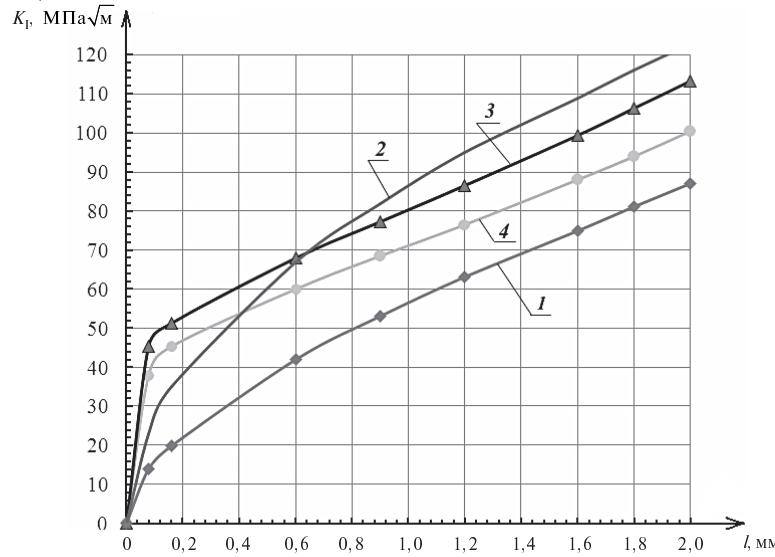


Рис. 2. Сравнение экспериментальных данных

с имеющимися решениями

(1 — X.А. Рихард; 2 — Горынин; 3 — МР (Овчинников);
4 — эксперимент)

Кривую 1 строим по интерполяционной формуле X.А. Рихарда [3] для круглых стержней с кольцевой трещиной, подверженных растяжению на бесконечности:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi l} \frac{1}{1 - \frac{l}{d}} \sqrt{\frac{A + B \frac{l}{d-l}}{1 + C \frac{l}{d-l} + D \left(\frac{l}{d-l}\right)^2}}, \quad (2)$$

где d — радиус стержня; $A = 1,26$; $B = -0,24$; $C = 5,35$; $D = 11,6$ — коэффициенты интерполяци-

онной формулы $\sigma = \frac{P}{\pi(d-l)^2}$.

С кривой 1 абсолютно совпали данные, представленные в справочниках по коэффициентам интенсивности напряжений [4, 5].

Кривую 2 строим по формуле В.И. Горынина [6]

$$K_I = 1,35 \frac{\pi - \omega}{\pi} \sqrt{l} (\sigma_p + \sigma_u) \alpha_i, \quad (3)$$

где ω — угол профиля резьбы; σ_p и σ_u — соответственно напряжения растяжения и изгиба; α_i — коэффициент перегрузки i -го рабочего витка; l — глубина кольцевой трещины.

Кривая 3 построена по методическим рекомендациям ЦНИИТМаш [7]. Формулы для ра-

счета КИН для кольцевых трещин глубиной $l = 0,25d_1$ (d_1 — внутренний диаметр резьбы) в болтах (шпильках) с метрической резьбой при воздействии на них продольного осевого усилия P имеют вид

$$K_I = \frac{4P}{\pi d_1^2} \sqrt{\pi l} \left[1,12 + 12 \left(\frac{l}{d_1} \right)^2 \right] \times \left[\left(\alpha_T - 1 \right) \frac{2}{\pi} \frac{\psi}{\sin \psi} + 1 \right], \quad (4a)$$

где $\psi = \arccos \xi$; $\xi = \frac{2,16 \alpha_T}{\alpha_T - 1} \frac{l}{\rho} \leq 1$;

$$K_I = \frac{4P}{\pi d_1^2} \sqrt{\pi l} \left[1,12 + 12 \left(\frac{l}{d_1} \right)^2 \right] \times \left[\left(\alpha_T - 1 \right) \frac{2}{\pi} \frac{\psi}{sh \psi} + 1 \right], \quad (4b)$$

где $\psi = \ln \left(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1} \right)$; $\xi = \frac{2,16 \alpha_T}{\alpha_T - 1} \frac{l}{\rho} \geq 1$; $\alpha_T = 1 + 0,65 \sqrt{S/\rho}$ и $\alpha_T = 1 + 1,57 \sqrt{S/\rho}$ — коэффициенты концентрации напряжений соответственно для не входящей в зацепление резьбы и для пер-

вого витка; ρ — радиус закругления в резьбовой впадине; S — шаг резьбы.

Кривую 4 построили по экспериментальным данным для нормальной трещины (рис. 1) и пересчитали по формуле (1).

Сравнение зависимостей $K_I = f(l)$, приведенных на рис. 2, свидетельствует о целесообразности использования для расчета КИН резьбовых соединений выражений (4), представленных в работе [7], так как отличие рассчитанных по этой формуле КИН от данных экспериментального исследования составляет не более 10 % и идет в запас прочности.

При поверочном расчете хрупкой прочности различных деталей и элементов конструкций не-

обходимо располагать данными о размерах гипотетических трещин, которые допустимы при гарантировании безопасности и надежности работы [8]. Оценка хрупкой прочности резьбовых соединений рассматривалась в работах [6, 9]. В работе [6] размер гипотетической кольцевой трещины не превышал одного шага резьбы. В работе [9] хрупкая прочность оценивалась при глубине кольцевой трещины равной двум шагам. Существующая неопределенность в выборе расчетного размера гипотетической трещины делает актуальным его обоснование.

Сопротивление хрупкому разрушению считается обеспеченным, если во всех расчетных ситуациях выполняется условие [4, 8]

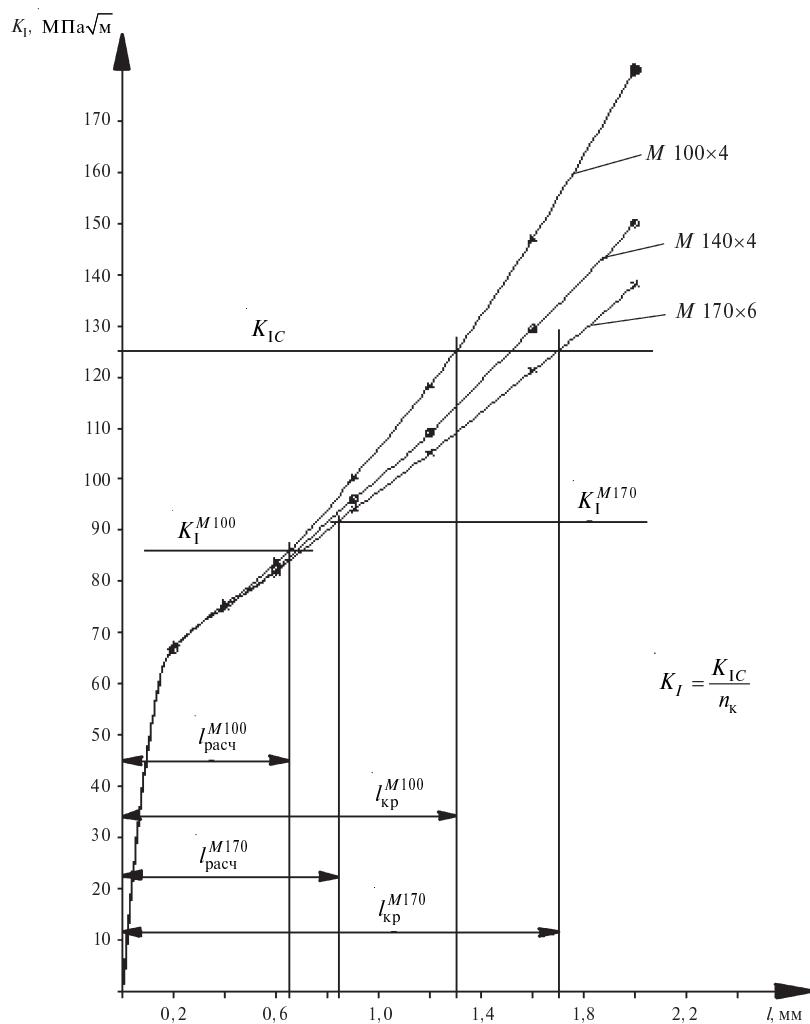


Рис. 3. Зависимость коэффициентов интенсивности напряжений от глубины трещины в резьбе шпильки и схема определения размера гипотетической трещины



$$K_I = \frac{K_{IC}}{n_k}, \quad (5)$$

где K_{IC} — вязкость разрушения (критический КИН); n_k — коэффициент запаса прочности по коэффициенту интенсивности напряжений.

Величину КИН K_I резьбовых соединений автор рекомендует определять по выражению (4). При изучении возможности использования формулы (4) при расчете КИН для шпилек паровых и газовых турбин, имеющих осевые отверстия, проводилось расчетное сравнение величин поправочных коэффициентов φ для сплошных и полых круглых стержней с кольцевой трещиной (по данным работы [4]). Установлено, что в рассматриваемом диапазоне изменения наружных и внутренних диаметров стержней, а также глубины кольцевой трещины значения φ не превышают 3 %. Это сравнение свидетельствует о возможности использования выражения (4) для шпилек, имеющих осевое отверстие.

Для принятия решения о назначении размера гипотетической трещины следует, используя выражение (4, б), построить K -тариоровку и определить критический размер трещины (рис. 3). Значения коэффициентов интенсивности напряжений в зависимости от размера кольцевой трещины, уровня напряжений в шпильке и размеров резьбы в шпильке представлены в таблице.

Уровень напряжения в шпильках принимался согласно инструкции 1001001ИМ по затяжке крепежа фланцевых соединений турбин, представленной ОАО «ЛМЗ», и составлял от 300 МПа до 380 МПа.

Из таблицы видно, что с уменьшением диаметра резьбы шпилек величина коэффициентов

интенсивности напряжений увеличивается. Поскольку с увеличением действующих напряжений текущие значения КИН также пропорционально увеличиваются, K -тариоровку строили при максимальном уровне напряжений (рис. 3). Далее определяли критический размер кольцевой трещины. Величину вязкости разрушения K_{IC} находим по справочнику [4] для сталей, используемых при изготовлении крепежных деталей узлов уплотнений разъемов энергетических установок (40ХФА, 12Х18Н10Т, 38ХН3МФА, 20Х1М1Ф1ТР (ЭП182)) и др., при температуре 293 К. На рис. 3 нанесено наименьшее из всех найденных значений вязкости разрушения. Если принять в выражении (5) величину коэффициента запаса прочности по коэффициенту интенсивности напряжений $n_k = 2$, то размер гипотетической трещины будет менее 0,002 м, т. е. менее половины шага резьбы (см. рис. 3), что вызывает определенные сомнения. Поэтому поступим следующим образом. Определим критические размеры трещин. Для шпилек М 170×6 и М 100×4 они составляют соответственно 0,017 и 0,013 м. Введем коэффициент запаса по размеру трещины $n_l = 2$ и для расчетного размера трещины определим текущее значение K_I . Далее уточняем величину n_k по формуле (5) и выражаем расчетный размер трещины через шаг резьбы. В результате проведенной процедуры получили наименьшее значение $n_k = 1,35$ и $l_{\text{расч}} = 1,5S$. Однако в связи с тем, что наименьшая величина коэффициента запаса прочности достаточно мала, окончательно принимаем размер кольцевой гипотетической трещины равным одному шагу резьбы. При этом наименьший коэффициент запаса прочности будет не менее 1,5.

Зависимость коэффициентов интенсивности напряжений от глубины кольцевой трещины, уровня напряжений в шпильке и размеров резьбы

Глубина трещины l , м	КИН K_I , МПа $\sqrt{\text{м}}$					
	М 170×6		М 140×4		М 100×4	
	$\sigma = 300$	$\sigma = 380$	$\sigma = 300$	$\sigma = 380$	$\sigma = 300$	$\sigma = 380$
0,006	65,3	82,7	64,9	82,2	66,4	84,1
0,009	74,4	94,2	75,6	95,8	79,3	100,5
0,012	83,2	105,4	86,5	109,6	93,3	118,2
0,016	95,6	121,1	102,0	129,2	115,5	146,3
0,018	102,0	129,2	—	—	—	—
0,02	109,0	138,1	119,0	150,7	142,2	180,1



Таким образом, при нормировании пове-рочных расчетов резьбовых соединений на хрупкую прочность рекомендуется КИН оп-

ределять по выражению (4, б), а размер гипотетической трещины назначать равным одному шагу резьбы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Титов, В.Б. К вопросу определения коэффициентов интенсивности напряжений резьбовых соединений [Текст] / В.Б. Титов, Т.А. Дудник.— В кн.: Актуальные задачи машиноведения, деталей машин и триботехники: Труды Международ. науч.-техн. конф., 27–28 апреля 2010 / Балт. гос. техн. ун-т.— СПб., 2010.— С. 122–126
2. Александров, А.Я. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела [Текст] / А.Я. Александров, М.Х. Ахметзянов.— М.: Наука, 1973.— 576 с.
3. Richard Hans Albert. Interpolationsformel fyr Spannungsintensitetsfaktoren [Текст] / Richard Hans Albert // VDI-Z. 1979.— 121, № 22.— S. 1138–1143.
4. Механика разрушения и прочность материалов [Текст]: Справочное пособие в 4 т. / Под общ. ред. Панасюка В.В.— Киев: Наукова думка, 1988.
5. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений [Текст]: С74 в 2-х томах / Пер с англ. под ред. Ю. Мураками.— М.: Мир, 1990.— 1016 с.
6. Горынин, В.И. Сопротивляемость деформированию и разрушению высокопрочных металлических материалов для крепежных деталей атомных энергетических установок [Текст]: автореф. дисс. ... докт. техн. наук / В.И. Горынин.— СПб., 1995.— 40 с.
7. МР 108.7–86. Методические рекомендации. Оборудование энергетическое. Расчеты и испытания на прочность. Расчет коэффициентов интенсивности напряжений [Текст] / ЦНИИТМАШ.— М., 1986.— Приложение 3.— 19 с.
8. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок П и НАЭГ-7-002–86.
9. Титов, В.Б. Моделирование напряженно-деформированного состояния оборудования АЭС с целью совершенствования методов расчета на хрупкую прочность [Текст]: автореф. ... канд. техн. наук / В.Б. Титов.— Москва, 1987.— 16 с.

УДК 621.746

В.И. Маслов, А.И. Арутюнян

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОИЗВОДСТВА ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ

В современной России насущная проблема производства продукции машиностроения — по-вышение ее конкурентоспособности в условиях поступления на наш рынок не только импортных товаров широкого потребления, но и практически любых изделий промышленного назначения: от готовых автомобилей до комплектующих и запасных частей. В то же время потенциал отечественного машиностроения еще достаточно высок благодаря наличию дешевых топлива, сырья, материалов, а также и достаточно недорогих трудовых ресурсов. Высок также и внутренний спрос на отечественную продукцию. Однако доля импорта в его замещении по-прежнему весьма высока из-за того, что наши изделия, хотя и предлагаются по более низкой цене, чем импортные, уступают им в качестве.

Из-за этого, в частности, производство отечественных поршневых колец, используемых в растущем парке автомобилей, тракторов, мотоциклов, имеет тенденцию к сокращению. Для коренного изменения такой ситуации, если учесть ценовую конкурентоспособность отечественных поршневых колец, необходимо и достаточно лишь повысить их качество до уровня зарубежных аналогов.

Поэтому целью проведенных нами исследований была разработка инновационной технологии управления точностью позиционирования ковша с расплавленным металлом по отношению к литьевой форме, что в свою очередь позволит существенно повысить качество изготовления отливок поршневых колец до заданного уровня.



Необходимо снижать отклонения положения ковша с расплавленным металлом при заливке литейных форм для поршневых колец. При неавтоматическом литье (а именно эти линии используются при изготовлении такой дешевой продукции, каковой являются поршневые кольца) эта задача решается путем повышения требований к квалификации литейщиков. Однако очевидно, что влияние человеческого фактора на позиционирование ковша при розливе металла без средств инструментального контроля высоты струи принципиально не может быть полностью исключено даже при высокой квалификации оператора. В результате часто (около трети случаев) положение ковша занижается и не обеспечивает достаточное давление струи заливаемого металла, а как результат — нарушается геометрическая форма кольца, возникают неспай либо появляются раковины и пористость в отливках, т. е. брак. Нередко, когда отсутствует управление высотой позиционирования, носик ковша при увеличении его наклона разбивает верхнюю кромку воронки.

С другой стороны, завышенное положение ковша приводит к увеличению высоты струи расплавленного металла, снижается его температура в песчаной форме, увеличивается время заливки, нарушается непрерывность струи металла, появляются пустоты и раковины в отливке. Из-за повышенной кинетической энергии происходит разрушение форм, что хорошо иллюстрирует рис. 1, на котором видно вытекание расплавленного металла из места разрушения. В таких случаях характеристики продукции не соответствуют требованиям в части однородности и прочности (появляются многочисленные газовые раковины, неметаллические включения — песчаные частицы из заливочной формы), а также существенно повышается расход металла из-за его вытекания из песчаной формы ввиду высокого давления.

Задачу обеспечения стабильности режима заливки металла, а следовательно, характеристик изготавливаемой отливки предлагается решать путем автоматизации управления позиционированием заливочного ковша. При выполнении технологической операции позиционирования с заданным качеством автоматизация управления позволяет, кроме того, повысить производительность и эффективность производственного процесса, а также снизить затраты по статье «зарплатная плата» — функция контроля переходит



Рис. 1. Разрушение заливочной формы поршневых колец при отклонении положения ковша сверх допустимого уровня

к автоматизированной системе управления качеством продукции. Очевидно, что стоимость системы автоматизации при таком решении не должна превосходить дисконтированного денежного потока на заработную плату.

Предложено технологическое решение автоматизации контроля высоты расположения заливочного ковша, на которое получен патент [1].

Для контроля положения ковша при заливке форм металлом целесообразна дистанционная идентификация поверхности расплавленного металла по спектру излучения. Регистрация уровня ковша может быть осуществлена по спектральному излучению дистанционно расположенными датчиками. Реализация такого способа регистрации уровня ковша требует выбора датчиков, спектральные характеристики чувствительности которых позволяли бы зафиксировать характерные спектры излучения ковша с расплавленным металлом на фоне излучений других объектов. Формализованная задача сводится к выбору такого датчика или совокупности датчиков, характеристики которых с требуемой погрешностью $\varepsilon_{\text{доп}}$ совпадают со спектральной характеристикой излучения. На рис. 2 изображена спектральная характеристика идентифицируемого объекта $I(\lambda)$.

Интервал излучения $\lambda_{\min} - \lambda_{\max}$ регистрируемого объекта представляется периодом 2π функции $f(x)$.

Тогда $f(x)$ разлагается в ряд Фурье

$$\begin{aligned} f_i(x) = & A_{0i} + A'_{1i} \sin x + A''_{1i} \cos x + \\ & + A'_{2i} \sin 2x + A''_{2i} \cos 2x + \dots + \\ & + A'_{ki} \sin kx + A''_{ki} \cos kx + \dots \end{aligned} \quad (1)$$

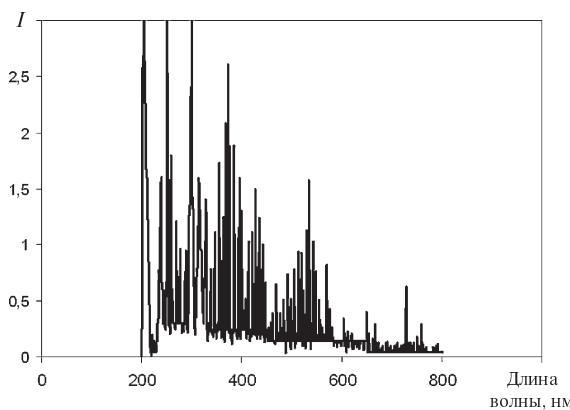


Рис. 2. Регистрируемая спектральная характеристика излучения

Полный набор коэффициентов Фурье (или преобразование Фурье) однозначно определяет соответствующую функцию $f(x)$ почти всюду в интервале разложения [2].

Аналогично представляется спектральная характеристика каждого датчика синтезируемого набора, которая дает зависимость потока I как функцию длины волны [3].

Математически формализовать задачу синтеза, т. е. подбора совокупности датчиков (числа и их видов), можно поставив задачу поиска таких k_{dj} , которые обеспечат минимизацию

$$F(x) = |f_i(x) - f_d(x)| \quad (2)$$

при выполнении условия допустимой погрешности

$$\varepsilon_{\text{доп}} \geq e_i + e_d. \quad (3)$$

$F(x, k_{dj})$ достигает минимума, равного нулю, при

$$\left\{ \begin{array}{l} A_0 - k_{d1}A_{0d1} - \dots - k_{dn}A_{0dn} = 0; \\ A'_1 - k_{d1}A'_{1d1} - k_{d2}A'_{1d2} - \dots - k_{dn}A'_{1dn} = 0; \\ A''_1 - k_{d1}A''_{1d1} - k_{d2}A''_{1d2} - \dots - k_{dn}A''_{1dn} = 0; \\ A'_2 - k_{d1}A'_{2d1} - k_{d2}A'_{2d2} - \dots - k_{dn}A'_{2dn} = 0; \\ A''_2 - k_{d1}A''_{2d1} - k_{d2}A''_{2d2} - \dots - k_{dn}A''_{2dn} = 0; \\ \dots \\ A'_k - k_{d1}A'_{kd1} - k_{d2}A'_{kd2} - \dots - k_{dn}A'_{kdn} = 0; \\ A''_k - k_{d1}A''_{kd1} - k_{d2}A''_{kd2} - \dots - k_{dn}A''_{kdn} = 0; \\ \dots \\ A'_M - k_{d1}A'_{Md1} - k_{d2}A'_{Md2} - \dots - k_{dn}A'_{Md_n} = 0; \\ A''_M - k_{d1}A''_{Md1} - k_{d2}A''_{Md2} - \dots - k_{dn}A''_{Md_n} = 0. \end{array} \right. \quad (4)$$

Полученная система уравнений (4) в формализованном виде отражает задачу синтеза набора датчиков с индивидуальными спектральными характеристиками чувствительности, а также удельного влияния k_{dj} на синтезируемую характеристику, в результате которого обеспечивается максимально возможное приближение спектральной характеристики излучения (или отражения) идентифицируемого объекта к результатирующей характеристике регистрирующих устройств.

Второй задачей идентификации ковша с расплавленным металлом является отнесение регистрируемой датчиком спектральной характеристики к кластеру расплавленного металла, а не фоновых излучений.

Наиболее часто критерием кластеризации служит среднеквадратичное отклонение характеристик, в рассматриваемом случае — их энергии излучения в диапазоне чувствительности, пороговое значение которой и служит границей кластеров.

Предлагается для кластеризации характеристик излучения i -го объекта использовать квадратичную форму отклонений составляющих ряда Фурье. Для этого в интервале излучения $\lambda_{\min} - \lambda_{\max}$ регистрируемого объекта i спектральная характеристика представляется функцией $f_i(x)$ в виде ряда Фурье:

$$\begin{aligned} f_i(x) = & A_{0i} + A'_{1i} \sin x + A''_{1i} \cos x + \\ & + A'_{2i} \sin 2x + A''_{2i} \cos 2x + \dots + \\ & + A'_{ki} \sin kx + A''_{ki} \cos kx + \dots, \end{aligned} \quad (5)$$

где A_{0i} — постоянная составляющая; A'_{ki} , A''_{ki} — амплитуды синусоидальной и косинусоидальной k -й составляющих ряда; величина x выражается через длину волны:

$$x = \omega\lambda = 2\pi \frac{\lambda - \lambda_{\min}}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}, \quad (6)$$

где $\lambda_{\max} - \lambda_{\min}$ — регистрируемый интервал спектра излучения.

Спектральную характеристику, принадлежащую другому объекту j , также можно представить рядом Фурье $f_j(x)$. Ограничимся конечным числом членов рядов $f_i(x)$ и $f_j(x)$. В этом случае возникают погрешности ε_i и ε_j , которые определяют, с одной стороны, требуемое число членов рядов, а с другой стороны, — минимальную границу кластеризации. Предлагаемый метод кла-

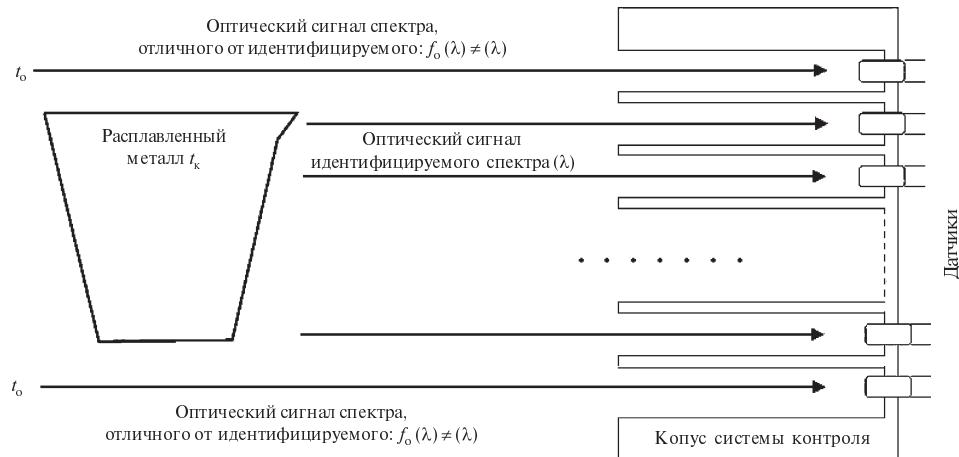


Рис. 3. Расположение датчиков контроля положения разливочного ковша

стерилизации объектов по спектральным характеристикам излучения $f_i(x)$ и $f_j(x)$, например принадлежащим к одному кластеру, основан на регистрации выполнения условия

$$\sum_{i=1}^N (f_{ik}(x) - f_{jk}(x))^2 \leq \varepsilon_i + \varepsilon_j. \quad (7)$$

При разложении характеристик в ряд Фурье получено условие выполнимости (3), которое сводится к следующему:

$$A_{0i} = A_{0j}, \quad A'_{li} = A'_{lj}, \quad A''_{li} = A''_{lj}, \\ A'_{2i} = A'_{2j}, \quad A'_{2i} = A'_2, \dots \quad A'_{ki} = A'_{kj}, \quad A''_{ki} = A''_{kj}. \quad (8)$$

Практическое применение предложенного метода кластеризации позволяет, существенно ограничив число контролируемых величин по сравнению со спектральным анализом, гарантировать тот же самый результат.

Разработана автоматическая система [1] (рис. 3, 4) контроля и отображения местоположения ковша. Способ, лежащий в его основе, предполагает регистрацию температур окружающей среды (t_0) и ковша (t_k) линейкой фотодиодов (датчиков) инфракрасного рабочего спектра, закрепленных на рейке (корпус системы контроля) на высотах требуемого положения ковша (объект идентификации) при каждой порции разливки металла, а также дополнительно одного фотодиода — выше верхнего уровня ковша, другого — ниже нижнего уровня ковша.

Расположение светодиодов на вертикальной линейке обеспечивает отображение расположения ковша. На линейке также располагаются отметки требуемого положения для выполнения

каждой дозы заливки. Шаг установки фотодиодов (а соответственно, — их число) равен допустимой погрешности позиционирования ковша.

Предложенная система дистанционного контроля положения ковша с расплавленным металлом изготовлена. Выполнены ее натурные испытания и исследования на технологической линии заливки чугуна при изготовлении поршневых колец. Автоматизированная система в действии в литейном цехе представлена на фотографии (рис. 5).

Устройство контроля положения ковша со светодиодной линейкой индикации и датчиками-фотодиодами (на фотографии — слева от ковша) закреплено на регулируемых кронштейнах. Расстояние от кромки воронки верхней опоки до нижнего фотодиода по вертикали устанавливается равным 20 см. Это обеспечивает контроль допустимой высоты струи расплавленного металла.

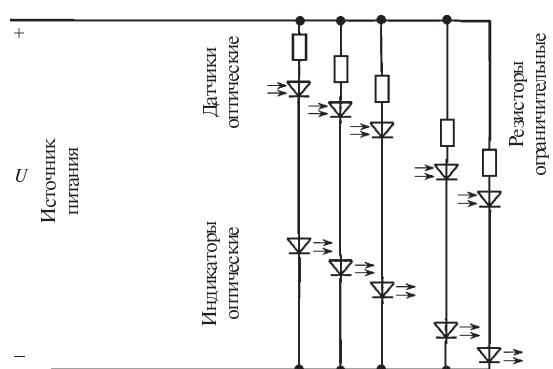


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема соединения датчиков и светодиодов индикации положения разливочного ковша



Рис. 5. Устройство контроля, заливочные формы и ковш с расплавленным металлом

ла (диапазон 20–25 см). По горизонтали оптимальное расстояние крепления устройства контроля составляет 30–40 см до кромки воронки.

При подаче расплавленного металла к стопкам оператор управляет подъемом (или снижением) ковша в зависимости от его заполнения расплавленным металлом. При заполненном ковше (100 кг металла) угол его наклона при розливе составляет 10–15°. По мере заполнения форм угол увеличивается до 120°. Существенно изменяется высота струи металла. Оператор-заливщик управляет электроприводом подвески подъема ковша по мере заливки каждой последующей стопки опок. Световой сигнал внутри линейки индикации отображает положение ковша через каждые 20 мм. Такая дискретность достаточно для поддержания оптимальной высоты струи металла в 200–250 мм, а также обеспечения оптимальной подачи расплавленного металла (2,5–3,5 кг/с).

Проведенные эксперименты показали заметное повышение качества отливок и снижение процента брака. Этим результатам будет посвящена отдельная статья.

Рассчитана ожидаемая экономическая эффективность от внедрения разработанной мето-

дики и устройства контроля положения ковша при розливе металла. Эффективность определяется снижением затрат по сравнению с базовым вариантом в связи с уменьшением брака, а также отсутствием необходимости постоянной замены контактирующих с расплавленным металлом датчиков. Она составляет для программ изготовления поршневых колец на ОАО «Ставропольский завод поршневых колец — СТАП-РИ» до 1 млн руб. в год в зависимости от программы выпуска изделий.

Предложен способ идентификации положения ковша с расплавленным металлом при изготовлении отливок деталей машин, основанный на кластеризации спектральных характеристик излучения металла при литье; он предполагает использование датчиков излучения и выбор характеристик последних по максимальной близости к первым. Разработано и экспериментально проверено устройство автоматизированного дистанционного контроля положения ковша при заливке металла в литьевые формы. Установлено снижение брака, повышение качества отливок, а соответственно, — обеспечение экономического эффекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ на полезную модель № 69233. Устройство для контроля положения ковша с расплавленным металлом [Текст] / В.Ф. Минаков и А.И. Арутюнян.— Зарегистр. в Гос. реестре полезных моделей РФ 10.12.2007. Приоритет от 25.04.2006.

2. Корн, Г. Справочник по математике для на-

учных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы [Текст] / Г. Корн, Т. Корн.— М.: Наука, 1977.— Изд. 4-е.

3. Сотсков, Б.С. Основы расчета и проектирования элементов автоматических и телемеханических устройств [Текст] / Б.С. Сотсков.— М.-Л.: Госэнергоиздат, 1953.



УДК 620.171.5:539.42

Т.А. Дудник, И.А. Богоев, А.С. Ласкин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМЫХ РАЗМЕРОВ ДЕФЕКТОВ В ЗАГОТОВКАХ КРУПНЫХ РОТОРНЫХ ВАЛОВ

Развитие энергомашиностроения сопровождается повышением единичных мощностей турбоагрегатов и ужесточением требований к их качеству и надежности. В энергетических установках особые опасения с точки зрения разрушения вызывают детали, вращающиеся с большими частотами, прежде всего — это металлоемкие и высоконагруженные роторные валы. Несмотря на постоянно совершенствующуюся технологию изготовления заготовок валов, metallurgическая промышленность не может обеспечить отсутствие дефектов в таких крупных поковках [1]. Наиболее часто встречаются скопления дефектов. Они, как правило, являются неметаллическими включениями размерами до 10 мм и расположены в радиально-тangенциальных плоскостях в осевой зоне поковок валов, доходящей до одной трети максимального диаметра поковки [2].

Действующие нормы на допустимые размеры дефектов (ДРД) заготовок валов установлены без учета напряженного состояния и изменения характеристик трещиностойкости по сечению валов. Они регламентируют размер одиночных дефектов в пределах от 3 до 8 мм. В нормах не отражено влияние на ДРД места расположения дефектов и их ориентации в теле вала, не основано ограничение на их количество. Отсутствуют данные на допустимые размеры множественных дефектов, а также на допустимые расстояния между дефектами (ДРМД). Нормы базируются на возможностях metallurgической промышленности и постоянно ужесточаются в связи с совершенствованием технологических процессов литья, ковки и термообработки. В то же время повышаются характеристики трещиностойкости стали и значительно увеличиваются рабочие напряжения. При прогнозировании прочности и работоспособности деталей и элементов конструкций, содержащих трещины, одним из самых распространенных и эффективных является подход, основанный на учете коэффициентов интенсивности напряжений (КИН). Известные аналитические и численные

методы определения КИН в задачах о взаимодействии трещин, а также о взаимодействии между трещинами и границами тел основаны на сравнительно простых моделях. Использование этих методов для решения задач о трещинах в реальных деталях, имеющих конечные размеры и сложные формы, трудно осуществимо, и поэтому необходимо использование экспериментальных методов, в частности метода фотоупругости [3].

При решении прикладных задач механики разрушения методом фотоупругости наибольшее применение нашла методика «замораживания» деформаций [2, 3]. Фотоупругие модели изготавливали из эпоксидной смолы ЭД-16 МТГФА. Отливка заготовок осуществлялась по общепринятой технологии. Значения КИН поперечных дефектов определяли на объемных призматических образцах при их одноосном однородном растяжении перпендикулярно плоскости дефектов, поскольку изменение осевых напряжений в валах по длине дефектов весьма мало и не превышает 2–3 %. Размеры образцов ($0,4 \times 0,09 \times 0,06$ м) и заложенных в них дефектов (диаметр $2l = 0,01$ м) обеспечивали отсутствие влияния взаимодействия дефектов с поверхностями моделей и однородное поле растягивающих напряжений вокруг дефектной зоны. Нагружение объемных призматических образцов осуществлялось с помощью рычажной системы и штифтовых захватов.

Значения КИН для радиальных дефектов валов определяли на дисковых моделях в поле центробежных сил. Модели бочки роторного вала турбоагрегата изготавливали в масштабе 1:4. «Замораживание» деформаций проводили при скорости вращения центрифуги 800–1000 об/мин (в зависимости от места расположения дефектов исходя из условий обеспечения в зоне дефектов окружных напряжений $\sigma_r = 0,10–0,15$ МПа).

При отливке призматических образцов и моделей бочки роторного вала турбоагрегата в них внедряли фторопластовые имитаторы трещиноподобных дефектов [4]. Физические свойства

фторопласта, крепление имитаторов посредством специального каркасно-натяжного приспособления позволили создать в образцах после их отверждения трещиноподобные пустоты с заданными ориентацией и местом расположения при отсутствии остаточных напряжений.

В каждом образце закладывали потри-четыре пары дефектов. В каждой серии условия эксперимента были абсолютно одинаковы для образцов и моделей. В зависимости от расположения дефектов в теле образца и относительно друг друга изготавливали три партии образцов с парами поверхностных, внутренних и поверхностно-внутренних дефектов. Для наиболее полного использования моделей в каждой из них было заложено при отливке по четыре пары дефектов. Угол между плоскостями дефектов составлял 90° . По месту расположения в теле моделей пары дефектов подразделялись на внутренние, поверхностные и поверхностно-внутренние.

После испытаний в термостате образцы и модели извлекались из нагрузочных приспособлений и распиливались на плоские срезы нормально фронту и плоскости трещин. Для исключения «размораживания» и искажения зафиксированных в срезах деформаций последние выпиливались, шлифовались и полировались вручную. Оптические измерения проводились на координатно-синхронном поляриметре КСП-7 с усовершенствованным координатным устройством, позволяющим получать точность 0,02 мм.

Перед выбором метода расчета КИН по данным фотоупругости необходимо по картине изохроматических полос сделать классификацию поля напряжений у вершины трещины, чтобы знать, какими КИН это поле напряжений описывается [2].

Картина изохроматических полос у вершин трещин всех срезов оказалась симметричной, что свидетельствует о наличии КИН типа K_I . Для определения K_I использовали графический метод Пирсона и Руиза [5], позволяющий не только определять размеры сингулярной области, но и сразу же находить неизвестные, используемые для расчета КИН по формуле

$$K_I = \sigma_{\Sigma} \sqrt{\pi l} f_I, \quad (1)$$

где f_I — безразмерный коэффициент, зависящий от геометрии детали, формы трещины и типа нагрузки; l — глубина поверхностной или полу-длина внутренней трещины.

Произведение $f_I \sigma_{\Sigma}$ в формуле (1) определяли из зависимости разности главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_2$ от величины $\sqrt{l/2r_i}$.

Также для определения f_I использовали метод Долгополова и Шилова [6].

Согласно этому методу поправочный множитель КИН определяли экстраполяцией линейного участка зависимости $f_{Ii} = f(l/2r_i)^{-0.5}$ в точку $r_i = 0$. Здесь f_{Ii} — мнимые значения поправочного множителя, определяемые для каждой изохроматической петли в вершине трещины по выражению

$$f_{Ii} = \frac{C_{\sigma} n_i (2r_i/l)^{-0.5}}{t\sigma}, \quad (2)$$

где C_{σ} — оптическая постоянная используемого материала; t — толщина среза; σ — номинальное напряжение; n_i — порядок изохроматической полосы; r_i — радиус i -й полосы под углом 90° к плоскости трещины.

Результаты проведенных исследований для различных сочетаний коллинеарных трещиноподобных дефектов роторных валов представлены на рис. 1.

Эффект взаимодействия оценивался отношением значения поправочной функции f_I на внутренней вершине трещин ($f_{I_{BH}}$) к значению этой функции на наружной вершине трещины (f_{I_H}). График поправочного коэффициента f_{I_B} на эффект взаимодействия $f_{I_B} = f_{I_{BH}} / f_{I_H}$ строили в зависимости от параметра λ , характеризующего расстояние между трещинами ($\lambda = (l_1 + l_2)/d$, d — расстояние между центрами дефектов). Кривые на рис. 1 демонстрируют, что для всех рассмотренных образцов и моделей эффект взаимодействия между дефектами при $\lambda \leq 0,5$ весьма незначителен ($f_{I_B} < 1,05$). При $\lambda > 0,5$ происходит заметное увеличение f_{I_B} , которое в зоне $\lambda \approx 0,8$ увеличивается до полутора раз. Прочность тела при этом зависит от размеров дефектов и от взаимодействия дефектов.

При $\lambda > 0,8$ эффекты взаимодействия становятся более интенсивными, и прочность тела определяется не размерами первоначальных дефектов и эффектом взаимодействия, а размерами интегрального дефекта.

Полученные в работе результаты позволили уточнить имеющиеся рекомендации по критериальным оценкам множественных дефектов.

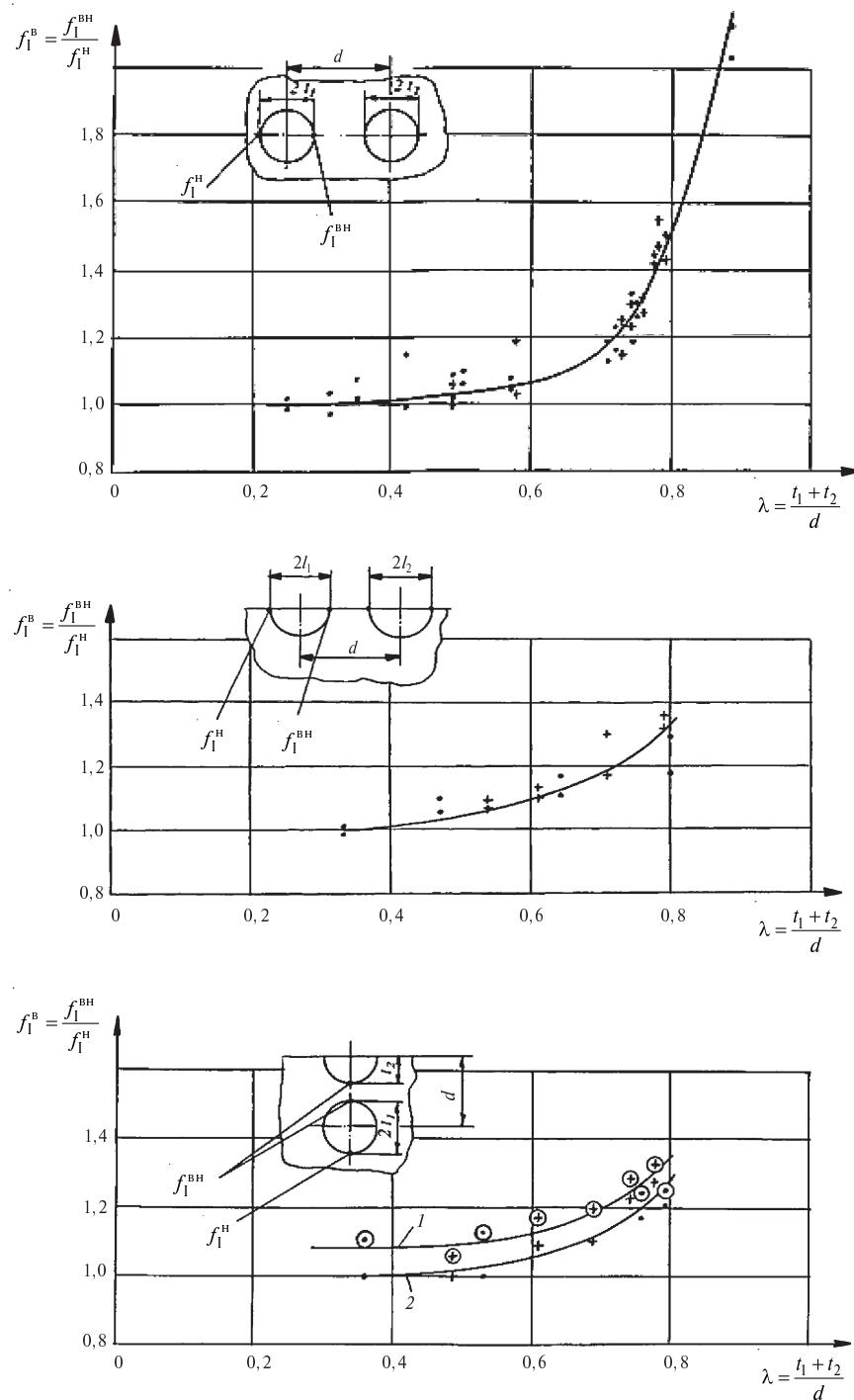


Рис. 1. Эффект взаимодействия для дефектов:

a — для внутренних дефектов (• — образцы; + — модели); б — для поверхностных дефектов (• — образцы; + — модели); в — для поверхностно-внутренних дефектов (• — образцы; + — модели; 1 — поверхностная трещина; 2 — внутренняя)

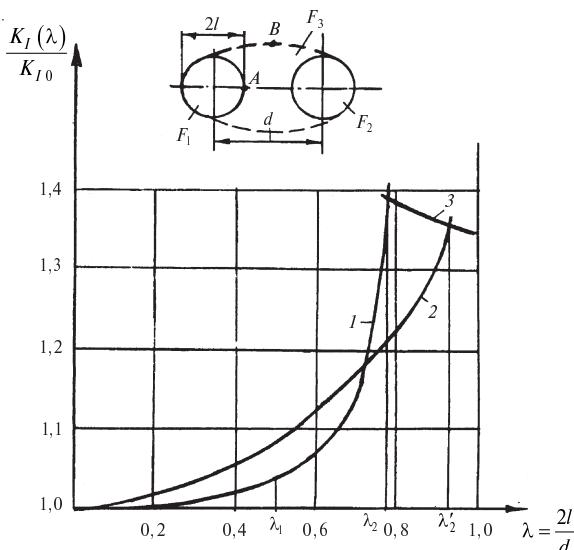


Рис. 2. Зависимость КИН от взаимодействия внутренних дефектов

Зависимость КИН от взаимодействующих внутренних дефектов представлена на рис. 2 в отношении к $K_{I_0} = \sigma(\pi l)^{0,5}$. f_{I_0} — КИН для одиночной круглой трещины.

Кривую 1 строили по экспериментальным результатам данной работы.

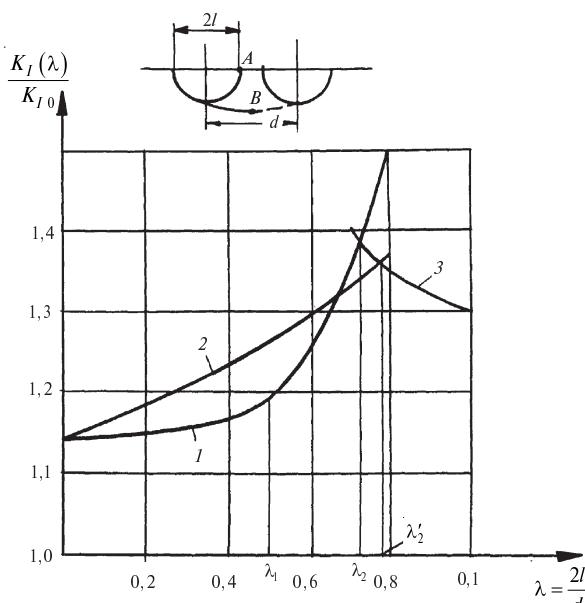


Рис. 3. Зависимость КИН от взаимодействия поверхностных дефектов:

1 — эксперимент в точке А; 2 — расчет по методике [7] в точке А; 3 — расчет в точке В [7]

Кривую 2 — по формуле [7]

$$K_I^A(\lambda) = \frac{1,13\sigma(\pi l)^{0,5}}{\left\{1 - \lambda^{1,8} \left[0,6 - \left(0,5 - \frac{1}{8\lambda}\right)^2\right]\right\}^{0,54}}. \quad (3)$$

Кривую 3 — по формуле, полученной автором ранее [2]:

$$K_I^B(\lambda) = \sigma[\pi l(\pi l + 2d)]^{0,25} f_{I_0} f_{\text{эл}}^B(\lambda). \quad (4)$$

$f_{\text{эл}}^B(\lambda)$ — поправочный коэффициент на эллиптичность дефекта в точке В.

За критерии классификации приняты два характерных значения относительных размеров дефектов — λ_1 и λ_2 , такие, что при текущем значении размера λ меньше λ_1 дефекты считаются одиночными, при $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$ — взаимодействующими, при $\lambda \geq \lambda_2$ — объединяемыми.

На основании полученных экспериментальных данных установлено, что для внутренних дефектов $\lambda_1 = 0,5$, $\lambda_2 = 0,77$. При $0,5 \leq \lambda \leq 0,77$ поправочный коэффициент f_{I_B} определяется зависимостью, представленной на рис. 1, а; при $\lambda < 0,5$ $f_{I_B} = 1$; при $\lambda > 0,77$ $f_{I_B} = 1,39$.

Для поверхностных дефектов аналогичные зависимости представлены на рис. 3: $\lambda_1 = 0,5$, $\lambda_2 = 0,73$; при $\lambda < 0,5$ $f_{I_B} = 1,14$; при $0,5 \leq \lambda \leq 0,73$ f_{I_B} определяется зависимостью, представленной на рис. 1, б; при $\lambda > 0,73$ $f_{I_B} = 1,38$.

Для поверхностно-внутренних взаимодействующих дефектов эффекты взаимодействия и значения λ_1 и λ_2 находятся в пределах, установленных для поверхностных и внутренних дефектов. Эти дефекты — частный случай поверхностных и внутренних дефектов. Поэтому дальнейшие расчетные оценки допустимых размеров множественных дефектов проведены только для внутренних и поверхностных дефектов.

Для дефектов радиальной и тангенциальной ориентации предлагается определять их допустимые размеры по следующей схеме.

Из формулы (1) находим критический размер дефекта a_k , принимая $K_I = K_{I_C}$; $\sigma = \sigma_m \varepsilon$, где σ_m — максимальный уровень статических напряжений в зоне дефекта; ε — коэффициент запаса по ним; f_I — экспериментально определенный безразмерный коэффициент для рассматриваемого сочетания дефектов.



Затем по формуле Вильсона [2]

$$I_d = \left[\left(l_{kp} \right)^{1-\frac{\pi}{2}} + \frac{C \Delta K_I^n}{\left(l_{kp} \right)^{n/2}} \left(\frac{n}{2} - 1 \right) N \right]^{-\frac{2}{n-2}}, \quad (10)$$

где $\Delta K_I = \Delta \sigma \left(\pi l_{kp} \right)^{0.5}$, f_I определяется ДРД (I_d) с учетом его роста за расчетное число циклов (N) при изменении напряжений за цикл, равном $\Delta \sigma$;

C и n — коэффициенты, характеризующие скорость роста усталостной трещины в данном материале.

Допустимые расстояния между дефектами радиальной и тангенциальной ориентации предложено определять в зависимости от критических и допустимых размеров дефектов исходя из условий:

для одиночных дефектов взаимодействие отсутствует в течение всей эксплуатации вала ($\lambda < \lambda_1$).

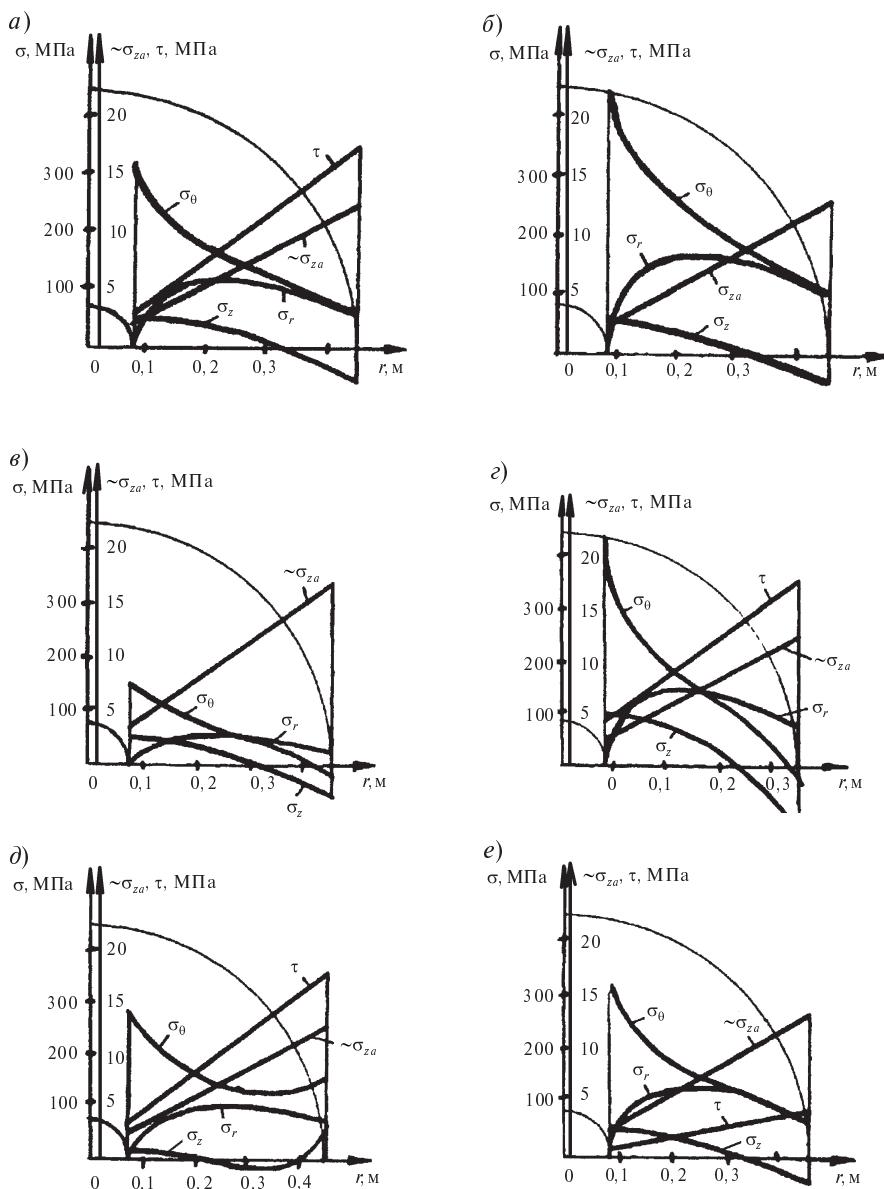
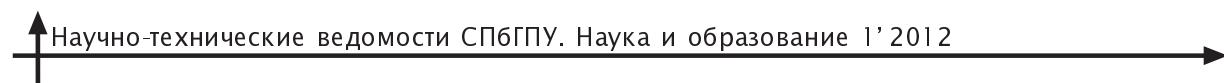


Рис. 4. Напряженное состояние тела бочки ротора
в различных эксплуатационных режимах:
номинальном (a); разгона (б); резонанса (в); пуска (г); остановки (д);
короткого замыкания (е)



для объединяемых дефектов разрушение перемычки ($\lambda > \lambda_2$) может произойти в любой момент эксплуатации, но дальнейший рост объединенного дефекта не приведет к разрушению вала. В этом случае необходимо рассматривать два варианта: разрушение перемычки в начале и в конце эксплуатации;

для взаимодействующих дефектов условие $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$ может наступить в любой момент эксплуатации.

ДРД и ДРМД для дефектов поперечной ориентации ввиду очень большого количества циклов осевых напряжений в валах ($N = (4-5)10^{10}$) предложено определять из условия отсутствия роста дефектов, т. е. в уравнении (1) $K_I = K_{th}$ (пороговый КИН); $\sigma = \sigma_{za} \beta'$, где σ_{za} — амплитуда осевых напряжений; β' — коэффициент запаса по ним. При этом относительные размеры дефектов неизменны, а следовательно, применимы критерии классификации дефектов λ_1 и λ_2 , определенные для статического нагружения.

В качестве примера применения разработанной методики определения ДРД и ДРМД рассмотрен вал ротора турбогенератора ТВВ-1200, изготовленный из стали 35ХН3МФА. В расчетах

использованы: для приповерхностной зоны вала $K_{lc} = 149 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ и $K_{lh} = 6 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$; для осевой зоны $K_{lc} = 104 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ и $K_{th} = 8 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ [8]. $C = 2,95 \cdot 10^{-11}$ и $n = 2,795$ [9] — наиболее консервативные (при самом быстром росте дефектов) значения коэффициентов уравнения Вильсона.

При оценке напряженного состояния рассчитываемого вала определены совокупности нагрузок, действующих в режимах пуска, останова, номинальной работы, разгонных испытаний и короткого замыкания. Для каждого режима установлены суммарные значения центробежных, термомеханических, посадочных, остаточных напряжений, а также напряжений от изгибающего и крутящих моментов (рис. 4).

Проведенные расчеты показали, что наличие дефектов в осевой зоне вала менее опасно, чем в приповерхностной. В среднем размер допустимых дефектов для этих зон отличается в пять раз. Причем для осевой зоны наиболее неблагоприятны дефекты радиальной ориентации, а для приповерхностной — поперечные.

По месту расположения вдоль оси вала наиболее опасны дефекты, расположенные в бочке вала. Их ДРД и ДРМД с учетом поправки на

Допустимые эквивалентные размеры l_d metallurgических дефектов и расстояний d между ними в роторном вале турбогенератора 1200 МВт

Тип дефектов	l_d и d , $\times 10^{-3}$ м	
	для поверхностных дефектов	для внутренних дефектов
<i>При радиальной ориентации дефектов в осевой зоне по сечению вала ($\mathcal{O} \leq 0,5 \mathcal{O}$ поковки)</i>		
Одиночные	$l_d = 2,66$ $d \geq 18$	$l_d = 3,87$ $d \geq 26$
Взаимодействующие	$1,15 < l_d < 2,66$ $12 < d < 18$	$1,73 < l_d < 3,8$ $15 < d < 26$
Объединяемые	$l_d = 1,2$ $d \leq 12$	$l_d = 1,7$ $d \leq 15$
<i>При поперечной ориентации дефектов в приповерхностной зоне ($\mathcal{O} > 0,5 \mathcal{O}$ поковки)</i>		
Одиночные	$l_d = 0,58$ $d \geq 4$	$l_d = 0,72$ $d \geq 5$
Взаимодействующие	$0,3 < l_d < 0,6$ $1,4 < d < 4$	$0,4 < l_d$ $d < 0,7$ $1,7 < d < 5$
Объединяемые	$l_d = 0,3$ $d \leq 1,4$	$l_d = 0,4$ $d \leq 1,7$

разрешающую способность дефектоскопического оборудования представлены в таблице.

Таким образом, в сравнении с существующими нормами ($l_d = 3 \cdot 10^{-3}$ м, $d = 3 \cdot 10^{-3}$ м) незави-

симо от месторасположения дефектов полученные результаты являются более жесткими для приповерхностной зоны и менее жесткими для осевой зоны вала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Захаров, В.Н.** Современное состояние производства уникальных поковок [Текст] / В.Н. Захаров, П.В. Склюев // Энергомашиностроение.—1983. № 3.— С. 40–44.
2. **Зубарев, Ю.М.** Моделирование и решение некоторых прикладных задач механики разрушения с использованием метода фотоупругости [Текст] / Ю.М. Зубарев [и др.].— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.— 288 с.
3. **Александров, А.Я.** Поляризационно-оптические методы механики твердого деформируемого тела [Текст] / А.Я. Александров, М.Х. Ахметзянов.— М.: Наука, 1973.— 576 с.
4. А.с. № 1293538 СССР, МКИ⁴ G 01 N3/00. Способ создания литой модели с трещинами / Ю.А. Бойченко, О.С. Минченков, Н.А. Костенко [и др.].— Опубл. 28.02.87. Бюл. № 8.
5. **Pearson, G.** Stress intensity factors for cracks in pressure vessel nozzles [Текст] / G. Pearson, C. Ruiz // Int. Journ. Of Fract.— 1977. Vol. 13.— P. 319–339.
6. **Долгополов, В.В.** Определение коэффициентов интенсивности напряжений методом фотоупругости [Текст] / В.В. Долгополов, С.Е. Шилов // Проблемы прочности.— 1975. № 2.— С. 108, 109.
7. **МР 108.7–86.** Методические рекомендации. Оборудование энергетическое. Расчеты и испытания на прочность. Расчет коэффициентов интенсивности напряжений [Текст] / ЦНИИТМАШ.— М., 1986.— 28 с.
8. **Бойченко, Ю.А.** Вязкость разрушения и оценка эксплуатационной надежности сталей и сплавов для деталей электрических машин [Текст] / Ю.А. Бойченко, А.В. Соснин.— Л.: ЛДНТП, 1979.— 23 с.
9. **Орестов, А.М.** Развитие экспериментальных методов механики разрушения с целью оценки трещиностойкости роторных валов [Текст]: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А.М. Орестов.— М., 1984.— 24 с.

УДК 621.735.79

М.М. Радкевич, Д.Ю. Фомин

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ

Задача улучшения прочностных и эксплуатационных характеристик изделий определяют необходимость разработки прогрессивных или совершенствования существующих технологических процессов изготовления деталей машин. Применение комбинированных методов, состоящих из двух условно самостоятельных циклов воздействия на металл — механического (деформация) и термического (термообработка), позволяет решать данную задачу. При всех видах деформационно-термических обработок эффект упрочнения достигается именно за счет деформационно-термического воздействия на металл. Благодаря возникающим при пластической де-

формации несовершенствам кристаллического строения образуются новые структурные (субмикроструктурные) состояния, которые в конечном счете определяют более высокие механические свойства.

К подобным технологическим процессам изготовления изделий можно отнести известные виды деформационно-термической обработки, в частности программную механико-термическую обработку и полугорячую штамповку поковок.

Целесообразность внедрения того или иного технологического процесса при изготовлении изделий в производственных условиях предпо-

лагает проведение предварительных всесторонних исследований. Большое значение при этом приобретает физическое моделирование технологического процесса в лабораторных условиях с целью изучения влияния деформационно-термических параметров на формирование структуры и механических свойств различных сталей.

Имеется достаточное количество унифицированного лабораторного оборудования для реализации подобных экспериментов. Лидер в производстве такого оборудования — компания Dynamic System Inc.(США).

В связи с недостаточностью сведений о влиянии режимов полугорячей штамповки поковок на механизм формирования структуры и комплекс механических свойства возникла необходимость проведения моделирования данного технологического процесса.

Цель нашего эксперимента заключалась в установлении влияния деформационных и термических параметров и определении оптимальных режимов полугорячей штамповки (температура нагрева — T_h , температура деформирования — T_d , степень деформации — ε , время последеформационной паузы — τ_p , скорость деформирования — $\dot{\varepsilon}_d$, температура отпуска — T_o) при изготовлении поковок из сталей 40Х, 20Х13, 08Х18Н10Т. Моделирование осуществлялось на базе модуля «растяжение—сжатие» пластиомера Gleeble-3800[1] лаборатории исследования и моделирования структуры и свойств металлических материалов факультета технологии и исследования материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Для проведения эксперимента в лабораторных условиях были изготовлены образцы специальной формы (рис. 1). Наличие в образцах отверстий позволяло обеспечить равномерное распределение температуры и деформации.

Проведение эксперимента проводилось в соответствии с выбранной температурно-временной схемой [2]: аустенизация при $T_h = 1200$ °C, последующее охлаждение до температуры деформации $T_d = 950\text{--}1100$ °C, деформация сжатием со скоростью 5 c^{-1} и степенью деформации $\varepsilon = 30\%$ и последеформационная пауза $\tau_p = 20\text{--}40$ с, охлаждение в масло или воду и заключительный отпуск при $T_o = 520$ °C.

Для стали 40Х был назначен следующий режим: нагрев до $T_h = 1200$ °C, аустенизация; свободное охлаждение до $T_d = 950$ °C со скоростью 30 °C/c; деформация по достижении $T_d = 950$ °C ($\varepsilon = 30\%$, скорость деформации 5 c^{-1}); последеформационная пауза 30 с — свободное охлаждение до $T = 860$ °C; закалка (охлаждение в масле со скоростью 100 °C/c); отпуск при $T = 520$ °C, охлаждение в масле.

Для стали 20Х13: нагрев до $T_h = 1200$ °C, аустенизация; свободное охлаждение до $T = 1000$ °C со скоростью $15\text{--}20$ °C/c; деформация по достижении $T_d = 1000$ °C ($\varepsilon = 30\%$, скорость деформации 5 c^{-1}); последеформационная пауза 30 с при $T = 1000$ °C; закалка: охлаждение в масле со скоростью $100\text{--}120$ °C/c; отпуск при $T = 450$ °C, свободное охлаждение на воздухе.

Для стали 08Х18Н10Т: нагрев до $T_h = 1200$ °C, аустенизация; свободное охлаждение до $T_d = 1100$ °C со скоростью 10 °C/c; деформация по достижении $T_d = 1100$ °C ($\varepsilon = 30\%$, скорость деформации 5 c^{-1}); последеформационная пауза 40 с — свободное охлаждение со скоростью $7\text{--}8$ °C/c до $T = 850$ °C; охлаждение в масле, со скоростью 100 °C/c.

Нагрев образцов производился электрическим током. При этом температура и скорости охлаждения контролировались термопарами, приваренными в двух точках рабочей части образца (рис. 2), одна из термопар была управляющей. Заданная температура в процессе проведения эксперимента выдерживалась с точностью ± 1 °C. Охлаждение

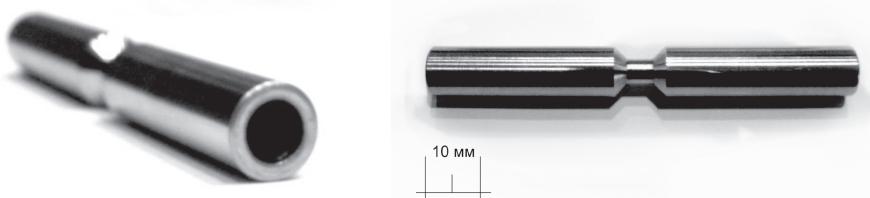


Рис. 1. Опытные образцы

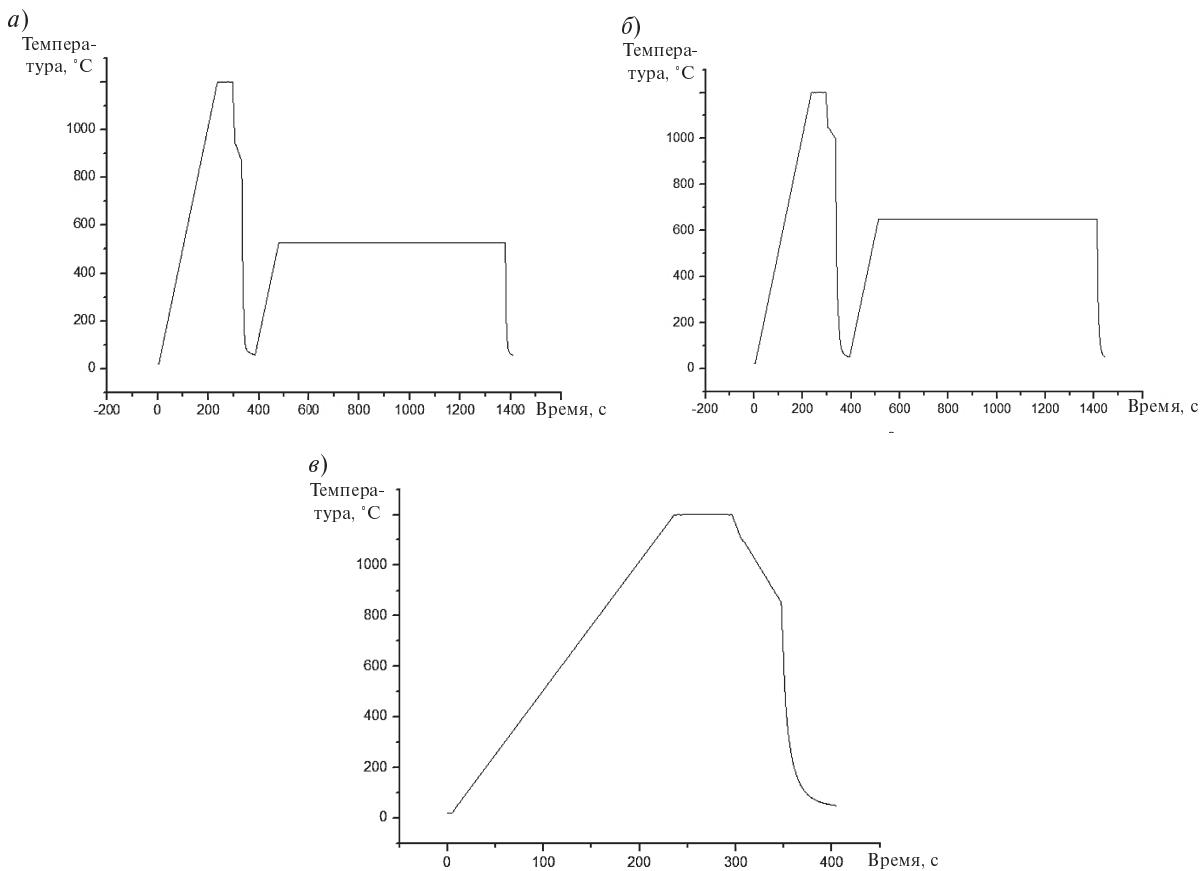


Рис. 2. Температурно-временная диаграмма процесса полугорячей штамповки
а — сталь 40Х, режим 1; б — сталь 20Х13, режим 2; в — сталь 08Х18Н10Т, режим 2

производилось за счет теплоотвода водоохлаждаемых медных захватов, в которых закреплялся опытный образец. Усилия деформации, а также продольная и поперечная деформации записывались с помощью соответствующих тензодатчиков.

На рис. 3 представлены графики режимов процесса полугорячей штамповки исследуемых сталей 40Х, 20Х13 и 08Х18Н10Т, реализованного в лабораторных условиях. Графики получены с помощью датчиков, установленных на испытательном модуле. Анализ графиков показал, что фактические режимы штамповки практически полностью совпали с назначенными по параметрам (температуры, скорости нагрева и охлаждения, степень деформации).

После проведения экспериментов из образцов, подвергнутых обработке, были изготовлены шлифы для металлографического анализа.

Металлографические исследования позволили установить, что в результате физического

моделирования процесса полугорячей штамповки структура стали 40Х (рис. 3, *a*) состоит из измельченного феррита, перлита и небольшого количества равномерно распределенного мартенсита, в то время как при обработке металла по заводскому режиму горячей штамповки [2] структура стали представляет смесь феррита и перлита с укрупненными областями свободного феррита.

Микроструктурные исследования лабораторных образцов из стали 20Х13 (рис. 3, *б*) показали, что в структуре образуется в основном мартенсит с незначительным количеством свободного феррита, в то время как при горячей штамповке по заводскому режиму в структуре стали образуются мартенсит, феррит и карбиды [2].

Структура образцов из стали 08Х18Н10Т (рис. 3, *в*) состоит из мелкозернистого равномерно распределенного аустенита.

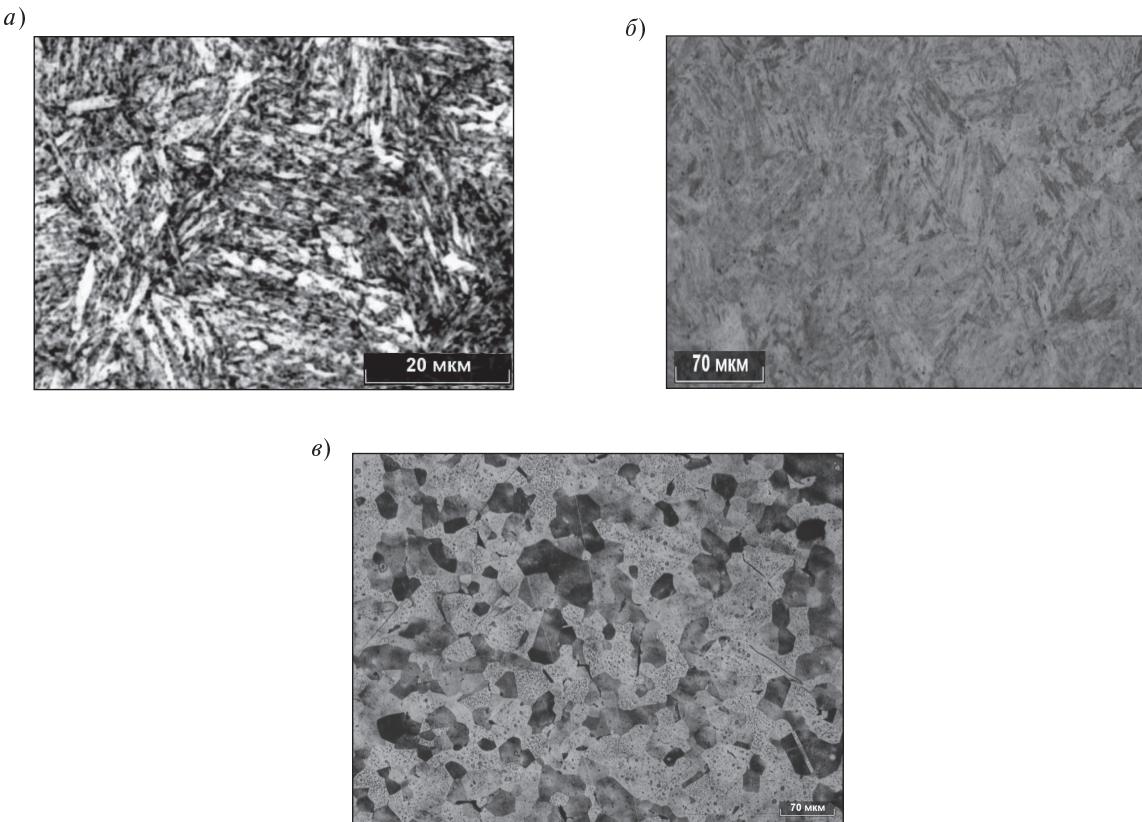


Рис. 3. Структура образцов после эксперимента
а — сталь 40Х; б — сталь 20Х13; в — сталь 08Х18Н10Т

Механические свойства образцов

Сталь	Твердость	G_b , МПа	$G_{0.2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KСU, кДж/м ²
40Х	33 HRC	1178	950	9	46,2	800
20Х13	46	HRC 1283	1082	13,1	46,4	630
08Х18Н10Т	144 HB	610	290	63	82	2200

Анализ прочностных и пластических характеристик показал их улучшение по сравнению со стандартной обработкой, применяемой на заводах:

для стали 40Х повышаются твердость на 39 %, предел прочности на 13 %, предел текучести на 8 %, ударная вязкость на 38 %

для стали 20Х13 повышаются твердость на 39 %, предел прочности на 44 %, предел текучести выше на 50 %, но ударная вязкость понижается на 25 %;

для стали 08Х18Н10Т повышаются твердость на 5 %, предел прочности на 3 %, предел

текучести на 2 %, а ударная вязкость понижается на 25 %.

Таким образом, проведенное физическое моделирование предложенного технологического процесса полугорячей штамповки показало, что назначенные режимы обработки исследуемых сталей, реализованные в лабораторных условиях, являются оптимальными. Использование данных режимов в заводских условиях для изготовления поковок из сталей 40Х, 20Х13 и 08Х18Н10Т обеспечит комплекс высоких механических свойств.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колбасников, Н.Г. Лаборатория «Исследование и моделирование структуры и свойств металлических материалов» [Текст] / Н.Г. Колбасников.— СПб.: Изд-во СПбГПУ.— 2009.
2. Радкевич, М.М. Технология упрочняющей деформационно-термической обработки [Текст] / М.М. Радкевич.— Саратов: Изд-во «ЛОДИ», 2003.

УДК 623.946.001.4:534.647

А.П. Ушаков

ИНФОРМАТИВНОСТЬ ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОДИАГНОСТИКИ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

Безопасность и надежность эксплуатации машин и конструкций, особенно используемых в энергетических системах, авиации, на железнодорожном, морском и автомобильном транспортах, в значительной степени зависит от совершенствования средств технической диагностики и неразрушающего контроля.

Из всего комплекса этих средств наиболее информативной можно считать вибродиагностику: в вибраакустическом сигнале содержится большой объем информации, позволяющей с использованием статистических и спектральных методов выявлять разнообразные дефекты, в том числе на ранних стадиях их развития.

Известно, что информативность традиционной контактной вибродиагностики ограничивается верхней частотой измеряемого сигнала, которая существенно снижается из-за установочного резонанса вибродатчика и наличия волнового резонанса пьезоэлемента вибро преобразователя.

Кроме того, в случае повышенной температуры поверхности объекта контроля снижается ресурс работы вибропреобразователя и искажаются результаты измерений.

К тому же, при вибродиагностике машин и механизмов, у которых применяются корпуса из легких немагнитных сплавов, невозможно использовать магнит для крепления датчиков в районе диагностируемых узлов.

Применение бесконтактной лазерной вибродиагностики в процессе отработки и эксплуатации машин и механизмов существенно расши-

ряет области использования методов диагностирования в силу следующих преимуществ:

возможности дистанционного бесконтактного измерения вибрации объекта контроля в любой точке в пределах зоны прямой видимости луча лазера;

широкого диапазона частот (от долей Гц до 50 кГц и более) и высокой точности измеряемой вибрации, в том числе конструкций с повышенной температурой корпуса.

Принцип действия лазерного бесконтактного виброметра основан на измерении сдвига частоты лазерного излучения, направленного на поверхность объекта контроля (ОК). Этот сдвиг пропорционален колебательной скорости объекта (эффект Доплера). В работе [1] подробно описан принцип работы лазерного виброметра.

Основные параметры отечественного лазерного виброметра, используемого автором при экспериментальных исследованиях, следующие:

частотный диапазон — от 0 до 50 кГц;

диапазон измеряемых виброскоростей — до 400 мм/с;

динамический диапазон — не менее 80 дБ;

расстояние до объекта — L — от 0,5 до 5 м (примечание: расстояние определяется мощностью лазера).

Например, лазерный виброметр PDV-100 фирмы «Politek» позволяет измерять вибрацию на расстоянии до объекта контроля от 0,2 до 30 м.

Лазерный виброметр предназначен для измерения продольной (к лучу лазера) проекции виброскорости поверхности исследуемого объекта

контроля. Поверхность ОК может быть любая и не требует специальной подготовки.

Выбор мест измерения вибрации на корпусах ОК и диапазон анализируемых частот должен осуществляться с учетом особенностей формирования информативного вибрационного поля и близости диагностируемого узла.

Основная часть колебательной энергии, несущей информацию о состоянии узлов ОК на средних и высоких частотах, распространяется по корпусным конструкциям в виде изгибных волн. Это обусловлено большой податливостью оболочек корпусов по отношению к поперечным силам и изгибающим моментам по сравнению с другими видами деформаций.

Физическая модель представления процесса распространения вибрации по корпусам ОК существенно зависит от соотношения длины изгибных волн и размеров характерных участков корпусных конструкций между стыковочными узлами или иными неоднородностями.

На сравнительно низких частотах корпус ОК колеблется как твердое тело (до первой резонансной частоты). Распределение вибрации вдоль корпуса определяется тем, насколько близко располагаются частоты возмущающих сил (например, частоты вращения валов) к собственным частотам поперечных, поворотных и продольных колебаний корпуса на узлах крепления к фундаментным конструкциям.

Далее в статье будут рассматриваться методы диагностирования на примере авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) АИ-25, хотя анализируемые закономерности характерны и для других машин и механизмов роторного типа.

В авиации и других областях машиностроения накоплен большой опыт в части методов диагностирования состояния роторных узлов на частотах их вращения по среднеквадратичным значениям виброскорости. Однако этого недостаточно для выявления дефектов на ранних стадиях их развития.

Как известно, уровень вибрации конструкций прямо пропорционален величине возмущающих сил, действующих в механизме, и обратно пропорционален механическому сопротивлению (импедансу) конструкции.

Проанализируем подробнее вибрационное поле корпусных конструкций авиационных двигателей.

Известно, что на средних и высоких частотах наблюдается неравномерное распределение вибрации вдоль корпусных конструкций вследствие влияния затухания колебаний из-за неоднородностей оболочки корпуса и степени близости виброактивных узлов [2].

Характер этих колебаний зависит от соотношения частоты вынужденных колебаний, генерируемых работающими механизмами, и так на-

зываемой «кольцевой» частоты $f_0 = \frac{C_L}{2\pi R_{B_{cp}}}$, при

которой по периметру корпусной конструкции укладывается длина продольной волны в материале оболочки. Здесь C_L — скорость продольных волн в материале оболочки; $R_{B_{cp}}$ — средний радиус оболочки корпуса, в котором возбуждаются колебания.

На частотах выше кольцевой ($f > f_0$) на поведение оболочки практически не влияет ее кривизна, и в ней могут в зависимости от характера возбуждения возникать изгибные, продольные и сдвиговые волны, все параметры которых соответствуют параметрам аналогичных волн в пластине толщиной, равной толщине оболочки (h_B).

На частотах $f < f_0$ кривизна оболочки существенным образом влияет на характер волн, и в оболочке распространяются волны с поперечным перемещением стенок оболочки, которые подобны изгибным волнам в пластине.

Волновые числа продольных и касательных колебаний оболочки имеют комплексный вид, поэтому волны этих типов быстро затухают и практически не переносят колебательную энергию вдоль корпуса.

Изгибные волны в оболочке в диапазоне $f < f_0$ распространяются по спирали, огибая ее на определенном отрезке длины тем чаще, чем выше число узловых линий на окружности.

На рис. 1 показаны характерные моды изгибных колебаний фрагмента цилиндрической оболочки.

Число полуволн форм колебаний в продольном направлении цилиндрической оболочки обозначим через i , а число волн в окружном направлении — через n . Число узловых линий форм колебаний, параллельных образующей, равно $2i$, а в окружном направлении — $n-1$ (не считая опорных линий).

Случай $n = 0$ соответствует осесимметричной форме колебаний цилиндрической оболочки.

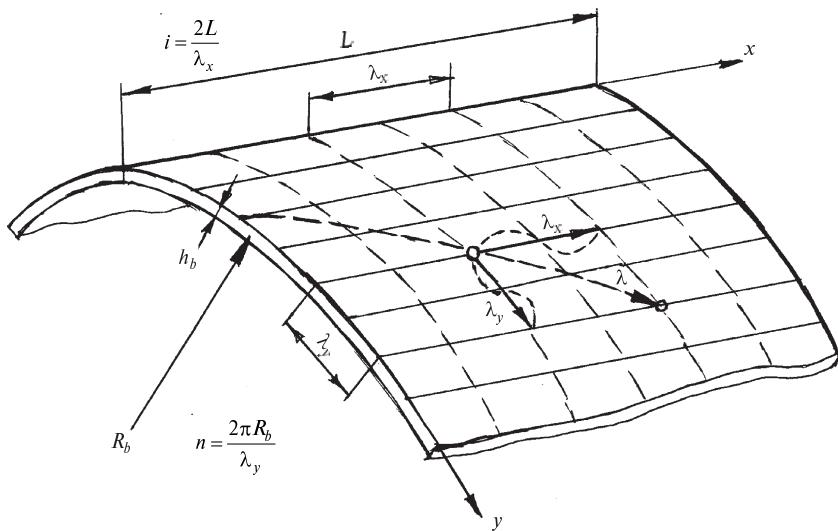


Рис. 1. Моды изгибных колебаний оболочки с узловыми линиями и диаметрами

Случай $n = 1$ соответствует кольцевой частоте f_0 , когда длина изгибной волны в оболочке равна длине окружности.

В диапазоне выше кольцевой частоты цилиндрическая оболочка может быть аппроксимирована эквивалентной пластиной.

Расчеты, выполненные применительно к типовым цилиндрическим корпусам газотурбинных двигателей (ГТД) показывают, что начиная с 2,5 кГц количество частот собственных колебаний (например, оболочки разделительного корпуса ГТД) возрастает с ростом частоты колебаний в степени 3/2.

Чем выше частота колебаний и сложнее конструкция корпуса узла ГТД, тем более равномерным становится вибрационное поле участка корпуса, ограниченного неоднородностями, из-за многочисленных отражений и преобразований различных типов волн друг в друга.

В этом случае создаются условия для формирования на высоких частотах диффузного (однородного) вибрационного поля в корпусах конструкций.

При этом распределение колебательной энергии — равномерное по площади участка корпуса ГТД, по крайней мере в пределах окружности, радиус которой составляет не менее четверти длины изгибной волны в оболочке корпуса.

Приближенное значение длины изгибной волны λ для металлических конструкций можно определить по формуле

$$\lambda = 100 \sqrt{h/f},$$

где h и f — соответственно толщина оболочки, м, и частота, Гц.

Направление луча лазерного виброметра в эту область позволяет без искажения измерить высокочастотную вибрационную энергию, пропорциональную квадрату колебательной скорости и несущую информацию о техническом состоянии узла ГТД, наиболее близко расположенного к точке контроля.

Отсюда видно преимущество использования в интересах диагностирования высокочастотного диапазона, в котором на участках внешнего корпуса имеются зоны с равномерным вибрационным полем.

С ростом частоты увеличивается и затухание вибрации вдоль корпуса, что позволяет, наряду со спектральным анализом, выполнять пространственное разделение дефектных узлов ГТД в процессе измерения и обработки диагностических сигналов.

Рассмотрим связь параметров вибрации корпуса ГТД, измеряемых в точках контроля, с изменением технического состояния его узлов.

В общем случае с определенными допущениями ОК можно рассматривать как линейную механическую систему, в которой частоты возмущающих сил, генерируемые работающими узлами, совпадают с частотами реакции корпусных конструкций системы на эти силы. Этот

факт позволяет идентифицировать источники вибрации.

Из опыта известно, что большинство дефектов проявляется на частотах, непосредственно связанных с частотами вращения роторов и подшипников, лопаточными и зубцовыми частотами, определяемых по кинематическим схемам узлов и агрегатов.

Зная кинематическую схему ОК можно рас считать спектральный состав вибрации нормально функционирующего агрегата и, оценивая его изменение, делать вывод о причинах повышенной вибрации и степени развития дефекта.

Генерируемые в ОК вибрации, содержащие основную информацию о техническом состоянии роторов и лопаточных систем компрессоров, камеры сгорания и турбин, подшипников, зубчатых приводов и вспомогательных механизмов, передаются с наименьшим затуханием на внешнюю часть корпуса в районе диагностируемого узла.

Например, вибрация корпуса турбокомпрессора формируется под непосредственным воздействием на внутреннюю поверхность корпуса со стороны потока воздуха и газа и под действием колебаний, передаваемых по несущим конструкциям от опор роторов компрессоров и турбин.

В процессе нормального функционирования в спектре вибрации ГТД содержатся различные дискретные составляющие, образующие звукоряды, кратные оборотным и лопаточным частотам компрессоров низкого и высокого давления (КНД и КВД), а также частотам вращения шестерен, роторов вспомогательных механизмов и частотам пересопряжения зубьев центрально го привода и качающих узлов насосов.

Дискретные составляющие имеют аэродинамическую и механическую природу. Так, при выбрасывании газа из межлопаточного канала каждой ступени компрессора и турбины возникают аэродинамические пульсации с частотами, равными произведению чисел лопаток ступени на количество оборотов ротора в секунду. Импульсный характер процесса приводит к формированию целого ряда гармоник, кратных лопаточной частоте каждой ступени.

Возникают и комбинационные составляющие в виде суммы и разности лопаточных частот соседних ступеней роторов компрессора и турбины.

Дискретные составляющие механической природы в приводах обусловлены переменной

жесткостью зацепления шестерен, а также погрешностью изготовления и сборки зубчатой передачи.

В результате развития дефектов формируются нестационарные вибрационные процессы, которые приводят к изменению по определенному закону во времени величин, характеризующих колебания (амплитуды, частоты и фазы). При этом в окрестностях лопаточных составляющих и их гармоник возникают модуляционные компоненты. По частотам несущего и модулирующего сигналов можно идентифицировать узел ГТД, в котором развивается неисправность, а по глубине амплитудной и индексу угловой модуляции определить степень развития дефекта.

Виброакустический сигнал можно трактовать как реализацию случайного процесса, что позволяет при проведении ряда периодических однократных измерений получить комплекс статистических характеристик для оценки степени изменения технического состояния основных узлов ГТД.

Ниже приведены результаты применения лазерной вибродиагностики с учетом бесконтактного измерения вибрации корпуса ГТД АИ-25 в условиях стендовых испытаний в лаборатории Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. На фото (рис. 2) показан один из лазеров на фоне двигателя.

Оценка состояния двигателя производилась с использованием анализа прямого и преобразованного спектра (спектргибающей) вибрационного процесса по глубине модуляции на информативных частотах, обусловленных импульсами, генерируемыми при взаимодействии дефектной и сопряженной деталей.

Дополнительная информация получалась путем анализа таких статистических характеристик вибрации в полосе высоких частот, как среднеквадратические значения виброскорости конструкций и плотности распределения вероятности мгновенных значений вибрации (ПРВ).

На рис. 3 представлена схема передачи аэrodinamических сил от лопаток и ротора первой ступени КНД через оболочку на наружную поверхность, вибрация которой дистанционно измерялась посредством луча лазерного виброметра.

Как уже было сказано, в процессе нормального функционирования в спектре вибрации КНД содержатся различные дискретные составляющие, образующие звукоряды, кратные об-



Рис. 2. Двигатель, установленный на стенде.

На переднем плане — лазерный виброметр, направленный на объект контроля.
Яркие точки на корпусе двигателя — это лучи подсветки, показывающие места измерения вибрации

ротным, лопаточным и комбинационным частотам компрессоров и турбин. Рассмотрим более подробно эти составляющие.

Оборотные звукоряды, т. е. частоты вращения ротора и кратных гармоник:

$$f = k f_{\text{вр}i},$$

где $f_{\text{вр}i}$ — частота вращения i -го ротора; k — номер гармоники.

Лопаточные звукоряды равны произведению числа лопаток ротора на оборотную частоту и кратных гармоник:

$$f_{\text{лп}} = f_{\text{вр}i} z_n,$$

где $f_{\text{вр}i}$ — частота вращения i -го ротора; z_n — число лопаток n -й ступени.

В случае развития дефекта появляются модуляционные составляющие на частоте вращения ротора:

$$f = k_1 f_{\text{лп}} \mp k_2 f_{\text{вр}},$$

где k_1, k_2 — номера гармоник.

Комбинационные звукоряды, представляющие собой сумму и разность лопаточных частот двух соседних ступеней, возникают в результате аэродинамического взаимодействия лопаток и передаются на корпус вибраций с лопаточными частотами

$$f = k_3 f_{\text{вр}} (z_n \pm z_m) \pm k_4 f_{\text{вр}},$$

где z_n, z_m — числа лопаток соседних ступеней ротора.

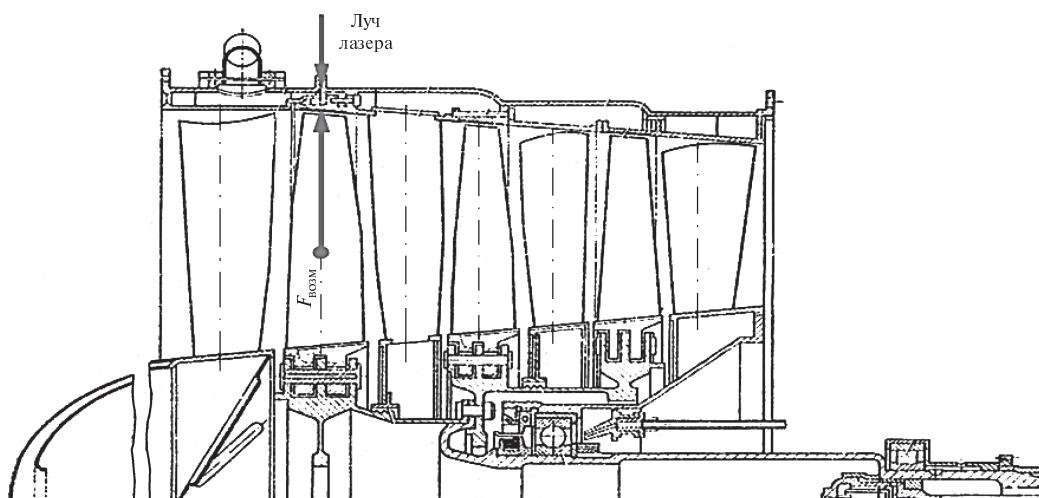


Рис. 3. Схема передачи аэродинамических сил от лопаток ротора на оболочку корпуса КНД

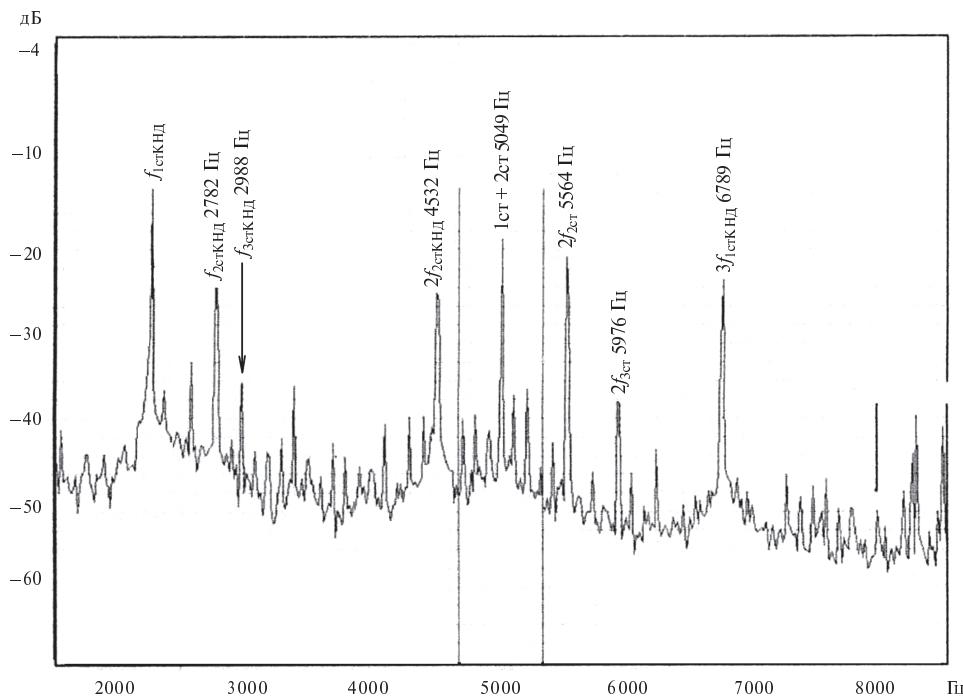


Рис. 4. Прямой узкополосный спектр виброскорости корпуса КНД

На рис. 4 представлен узкополосный прямой спектр вибрации (измерен лучом лазера) корпуса компрессора низкого давления двигателя АИ-25. По горизонтальной оси — отложена частота в Гц в линейном масштабе, а по вертикальной оси — значения виброскорости в логарифмическом масштабе в дБ относительно $5 \cdot 10^{-5}$ мм/с.

В спектре вибрации видны лопаточные звукоряды трех ступеней КНД, а также вторые и третьи гармоники. Кроме того, в спектре наблюдается суммарная составляющая лопаточных частот первой и второй ступеней (5049 Гц), промодулированная оборотной частотой вращения ротора КНД.

Наличие боковых составляющих, кратных оборотной частоте ротора, свидетельствует о развитии дефекта. В выделенной в прямом спектре вибрации полосе частот 4,7–5,3 кГц (на рис. 4) был рассчитан спектр огибающей, глубина модуляции которой составила 19 %.

В практике диагностирования встречаются случаи, когда по мере развития дефекта уменьшается величина коэффициента модуляции, так как импульсы от возмущений, связанных с дефектом, становятся хаотичными.

Для страховки от принятия ошибочного решения, наряду с оценкой глубины модуляции,

целесообразно также использовать анализ вибрации в высокочастотном диапазоне в виде среднеквадратичного значения (СКЗ) и плотности распределения вероятности (ПРВ) виброскорости. В качестве примера рассмотрим приведенные в работе [1], выполненной с участием автора, результаты диагностирования в процессе стендовых ресурсных испытаний коробки приводов.

На этом испытании развивался износ с последующим разрушением зубьев шлицевого вала привода насоса. Разрушение, по-видимому, было связано с накоплением повреждений, вызванных крутильными колебаниями шестерен узла привода. При этом существенную роль могло сыграть наличие знакопеременной деформации корпуса привода из-за большой неуравновешенности ротора близко расположенного генератора.

Анализ спектров вибрации в окрестности второй гармоники зубцовой частоты центральной ступени зубчатого перебора в зависимости от наработки, а также данных, приведенных в таблице, показал на 265 часу работы резкий рост глубины модуляции (до 32 %) с частотой соударения зубьев шлицов. Одновременно возросло значение ПРВ до максимального значения.

Статистические характеристики сигнала вибрации на разных стадиях развития дефекта (разрушение зубьев шлицов)

Состояние узла	СКЗ виброскорости (мм/с) в полосе 26–28 кГц	ПРВ в полосе 26–28 кГц	Глубина модуляции, % в полосе 9–13 кГц
Перед разрушением (на 170 часу)	1,64	16,7	11
В момент срезания шлицов, (на 265 часу)	1,68	26,4	32
В процессе «перемалывания» продуктов износа (на 300 часу)	3,6	10	17

Это связано с разрушением зубьев шлицов, что подтвердила разборка шлицевого соединения после остановки испытания [1].

В таблице приведены глубины модуляции в окрестностях второй гармоники частоты зацепления (в полосе частот 9–13 кГц) и вышеуказанные статистические характеристики сигнала вибрации (СКЗ виброскорости и плотность распределения вероятности в полосе частот 26–28 кГц). В этой полосе отсутствуют периодические составляющие спектра вибрации.

На последней стадии разрушения глубина модуляции и значение ПРВ начали уменьшаться.

К концу испытания глубина модуляции достигла значения 17 %, а ПРВ уменьшилась до 10. Одновременно из-за хаотических ударов в разрушающемся шлицевом соединении в прямом спектре вибрации более чем в два раза вырос уро-

вень сплошной части спектра на высоких частотах.

Такой ход изменения вибрации объясняется степенью влияния износа шлицов. Снижение глубины модуляции и ПРВ может быть объяснено переходом от периодических импульсов к случайным ударам в шлицевом соединении сразу после срезания зубьев.

Из таблицы видно, что характер изменения значения СКЗ виброскорости существенно дополняет анализ по методу огибающей, так как значительно увеличивается по мере развития дефекта и последующего разрушения, в отличие от глубины модуляции и ПРВ, которые при переходе от износа к началу разрушения вначале скачкообразно возрастают, а затем уменьшаются.

Данный пример подтверждает преимущество использования бесконтактной лазерной диагно-

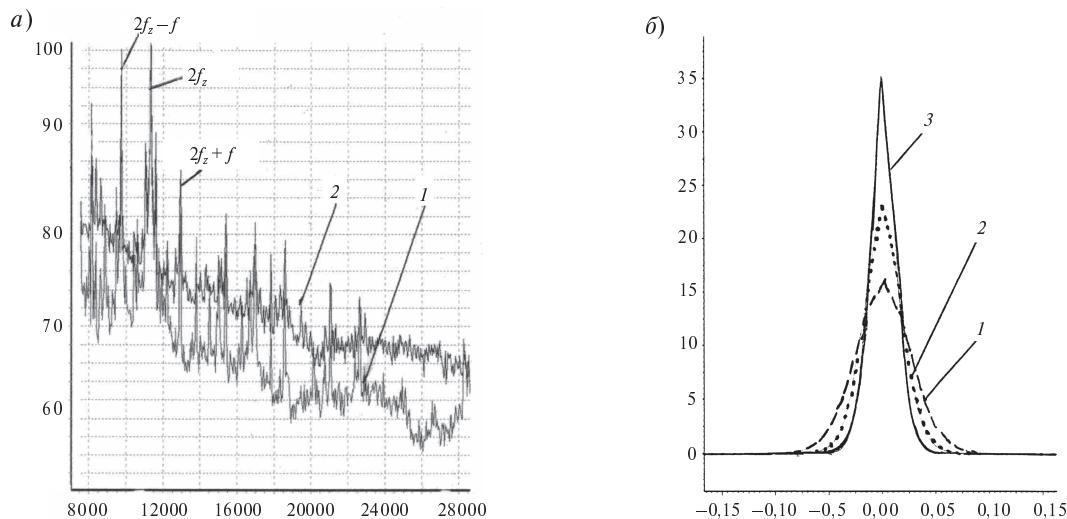


Рис. 5. Изменение параметров высокочастотной вибрации:

узкополосные спектры вибрации (а, 1 — в процессе интенсивного износа, 2 — в процессе разрушения шлицов) и плотности распределения вероятности (б, 1 — в начале износа, 2 — развитие износа, 3 — начало разрушения)

стики по сравнению с контактными методами измерения вибраций в связи с тем, что можно измерить наиболее информативную высокочастотную вибрацию корпуса и навесных агрегатов ГТД в любой точке в зоне прямой видимости луча лазера без предварительной подготовки.

Таким образом, применение лазерной вибродиагностики позволяет бесконтактным способом оперативно произвести оценку технического состояния машин и конструкций, а также повысить достоверность прогноза степени развития дефектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков, А.П. Применение лазерной вибродиагностики в процессе стендовых испытаний агрегатов авиационной техники. [Текст] / А.П. Ушаков, А.В. Озеров, А.Ю. Калеменев, П.А. Хабаров // Межвуз. темат. сб. научных трудов «Проблемы

эксплуатации и совершенствования транспортных систем». — СПб., 2009.— Том XI.— С. 5–15.

2. Никифоров, А.С. Распространение и поглощение звуковой вибрации на судах [Текст] / А.С. Никифоров, С.В. Будрин // Л.: Судостроение, 1968.



МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 669.1.017:669.018.44:669.018.28:621.74.011

*А.С. Орыщенко, С.Ю. Кондратьев, Г.П. Анастасиади,
М.Д. Фукс, С.Н. Петров*

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ЖАРОПРОЧНОМ СПЛАВЕ 45Х26Н33С2Б2 ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ.

Сообщение 1: ЛИТОЕ СОСТОЯНИЕ

Одна из важных задач современного материаловедения — обеспечение базовых отраслей промышленности конструкционными материалами, гарантирующими длительную безаварийную эксплуатацию изделий и конструкций во все более усложняющихся температурно-силовых условиях нагружения. Это в полной мере относится и к высокотемпературным установкам нефтехимических и металлургических производств, причем основное требование к используемым материалам — жаропрочность [1].

В качестве штатных конструкционных материалов для змеевиковых систем высокотемпературных установок различного назначения применяются жаропрочные сплавы на основе композиций Х25Н20 и Х25Н35. Эти сплавы — сложнолегированные системы, упрочнение в которых происходит за счет того, что в их структуре при кристаллизации и охлаждении образуются карбидные фазы различного состава, формирующиеся в виде межкристаллитной сетки и отдельных частиц [1, 2]. Сплавы используются в литом состоянии, поскольку считается, что оно обеспечивает наиболее высокую длительную прочность при температурах эксплуатации [3]. Однако известно, что литое состояние сплавов является метастабильным вследствие значительной структурной и химической неоднородности [4, 5]. Для каждого сплава существует своя температурная область разупрочнения, в которой он переходит в термодинамически более равновесное состояние [6]. Следовательно, реальная жа-

ропрочность сплава определяется одновременно как его структурным состоянием, так и степенью устойчивости этого состояния. Последнее зависит от температуры начала выделения (или растворения) вторичных карбидных фаз и коагуляции частиц и структурных составляющих, а также от скорости протекания этих процессов.

Таким образом, изучение структурной стабильности жаропрочных сплавов на основе системы Fe-Cr-Ni и выявление механизма разупрочнения при температурах эксплуатации — актуальная задача, решение которой позволит определить пути увеличения срока службы изготавливаемых из них высокотемпературных установок.

Целью настоящего исследования является изучение устойчивости структуры и фазового состава литого сплава на основе базовой композиции Х25Н35 при длительном высокотемпературном воздействии. В данной статье рассматриваются результаты первого этапа исследования — анализа структурного состояния сплава в литом (исходном) состоянии.

Материалом исследования был выбран сплав марки 45Х26Н33С2Б2, разработанный ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» и используемый для изготовления радиантных змеевиков высокотемпературных установок пиролиза [7]. Сплав выплавляли в индукционных печах емкостью 500 кг на чистых шихтовых материалах (по ТУ 1333-032-07516250-2008) и разливали в песчаные формы — стандартные клиновые литьевые про-

бы (по ГОСТ 977–88). Фактический химический состав исследованного сплава характеризуется следующим содержанием элементов, масс. %:

C	0,48
Si	1,86
Mn	0,91
Cr	24,6
Ni	35,3
Nb	1,72
W	0,57
Mo	0,23
Ti	0,14
N	0,05
Fe	Ост.

Из литых заготовок для структурных исследований изготавливали образцы размером $10 \times 10 \times 15$ мм.

Исследование микроструктуры сплава выполняли на оптическом металлографическом микроскопе Carl Zeiss Axiovert 40 при увеличениях $\times 50$ – 1000 с помощью программы автоматического количественного анализа изображений согласно процедуре ASTM E 1245–03. Фазовый анализ сплава проводили с использованием микрорентгеноспектрального анализатора Tescan VEGA 5136 LM. Для выявления структуры сплава применяли электролитическое травление в 10 %-й щавелевой кислоте. Изготовление и подготовку металлографических шлифов выполняли на оборудовании фирмы «Buehler» согласно стандарту ASTM E 3–95.

Металлографический анализ показал, что микроструктура сплава 45Х26Н33С2Б2 в литом состоянии представляет собой γ -твердый раствор (аустенит) и значительное количество избыточ-

ных фаз (рис. 1). Твердый раствор имеет ярко выраженное ячеистое дендритное строение с тонкими межкристаллитными границами. Избыточные фазы располагаются преимущественно по границам кристаллитов в виде эвтектики, а также равномерно распределенных отдельных включений. Эвтектика имеет дисперсное строение, а отдельно расположенные фазы — более крупные, причем характер включений различен. Границы части ветвей второго порядка, декорированные отдельными карбидами, протравлены слабо, что связано с необходимостью привязки координат структурных составляющих и частиц, а также минимального воздействия на структуру в связи с последующим анализом химического состава структурных составляющих и фаз микрорентгеноспектральным методом (рис. 1, б, в).

Результаты количественного металлографического анализа дают следующие параметры микроструктуры сплава 45Х26Н33С2Б2 в литом состоянии:

Размеры дендритных осей I порядка, мкм	
длина	2000–3000
ширина	150–180
Размеры дендритных осей II порядка, мкм	
длина	200–300
ширина	60–90
Доля структурных составляющих, объемн. %:	
γ -твердый раствор	65–70
эвтектика и включения	30–35

Из полученных экспериментальных данных следует, что среднее значение доли матричного твердого раствора в литой структуре составляет около 70 объемн. %, остальное — эвтектика

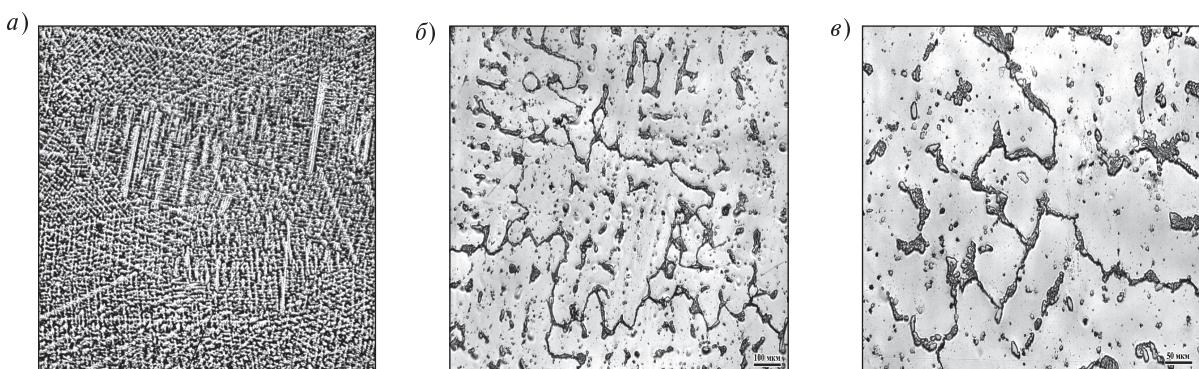


Рис. 1. Микроструктура сплава 45Х26Н33С2Б2 в литом состоянии:
увеличение в 12 (а), 100 (б), 200 (в)



и отдельные включения. Длина осей дендритов I порядка примерно в 10 раз превышает длину осей II порядка.

Общее распределение химических элементов в структуре сплава качественно показано на рис. 2. Видно, что границы дендритных ветвей первого и второго порядка обогащены кремнием, обеднены никелем и железом. Ниобий находится главным образом в карбидах. Хром является основным элементом, образующим карбиды, которые входят в состав эвтектики, располагающейся по границам кристаллитов.

Степень ликвации компонентов сплава в твердом растворе и состав избыточных фаз определяли методом микрорентгеноспектрального анализа. При этом оценивали изменение состава твердого раствора при перемещении вдоль и поперек осей дендритов первого порядка, а также в отдельных осевых участках ветвей второго порядка (рис. 3).

Анализ концентрации химических элементов в литой структуре сплава 45Х26Н33С2Б2 не выявил изменений вдоль осей дендритов, однако показал неравномерный характер их распределения поперек осей. По рис. 4, 5 видим, что от центра дендрита к его границам содержание марганца, кремния и хрома увеличивается, а содержание вольфрама незначительно уменьшается. Это можно объяснить ликвацией компонентов при кристаллизации с коэффициентом распределения $k < 1$ для Mn и Si и $k > 1$ для W. Обеднение границы дендрита железом и обогащение хромом объясняется образованием эвтектики ($\gamma +$ карбид хрома), точнее, ($\gamma + \text{Me}_x\text{C}_y$), так как в карбидной составляющей по данным анализа содержится (в масс. %): 72–77 Cr; 7–9 Fe; до 2 Ni; 1,2–1,4 W; 0,4–0,6 Mo и 0,2 V. Распределение Ni, Nb, Mo в твердом растворе можно считать равномерным с учетом образования карбида ниobia.

Для определения достоверности полученных зависимостей (см. рис. 4, 5) проводили статистическую обработку результатов с оценкой средних значений, стандартного отклонения и критерия Фишера для дисперсий ($F_{2/1} = s_2^2 / s_1^2$, где $s_2^2 > s_1^2$). Однородность сравниваемых распределений определяется условием $F_{2/1} \leq F_{\text{табл}}$. Табличное значение для выборок $n_1 = 6$, $n_2 = 5$ при доверительной вероятности 0,05 составляет $F_{\text{табл}} = 6,4$.

Результаты статистической обработки представлены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что только кремний и хром распределяются по мере роста дендритов (по толщине) неравномерно. Распределение марганца и никеля, вероятно, зависит от кинетики роста дендритов.

Анализ химического состава междендритных пространств в структуре сплава подтвердил установленную закономерность. Рис. 6 и соответствующая ему табл. 2 показывают, что междендритные пространства значительно обогащены кремнием и хромом и обеднены железом. Так, содержание в них кремния и хрома соответственно на 0,5–0,8 и 1,1–1,6 масс. % выше, а железа — на 2,2–2,8 масс. % ниже по сравнению с центральной зоной осей I и II порядка. Содержание остальных химических элементов в междендритных пространствах и осях дендритов практически одинаковое.

Распределение карбиообразующих элементов — хрома, ниobia, титана — определяется кинетикой образования и растворения карбидных фаз (см. табл. 1).

Важно отметить, что карбид Me_xC_y , который образует эвтектику, располагающуюся по границам дендритов, имеет неоднородное содержание основного элемента — хрома. Это подтверждается следующим: 1) для карбидов Me_xC_y статистические результаты для пятнадцати спектров анализа различных микрообластей при разбросе содержания хрома (в масс. %) в пределах 72–77 составляют $x_{\text{ср}} = 75,28\%$ и $s = 1,35\%$; 2) для карбидов Me_xC_y одной микрообласти (на границе дендритной ячейки) длиной 90 мкм и шириной 15–45 мкм (рис. 7 и табл. 3) статистические результаты для семи спектров анализа при разбросе содержания хрома 77,1–79,8 % составляют $x_{\text{ср}} = 78,46\%$ и $s = 1,02\%$. Маловероятно, что границы дендритных ячеек с такими различными размерными характеристиками и химическим составом могут быть одинаково стабильными при высокой температуре (1100–1200 °C) и длительном времени работы (более 100 часов).

Следует отметить присутствие в карбидах хрома тугоплавких элементов: Mo, W, Fe, Ni. В противоположность этому Nb и Ti в составе карбидов хрома не обнаружены (см. рис. 7, табл. 3).

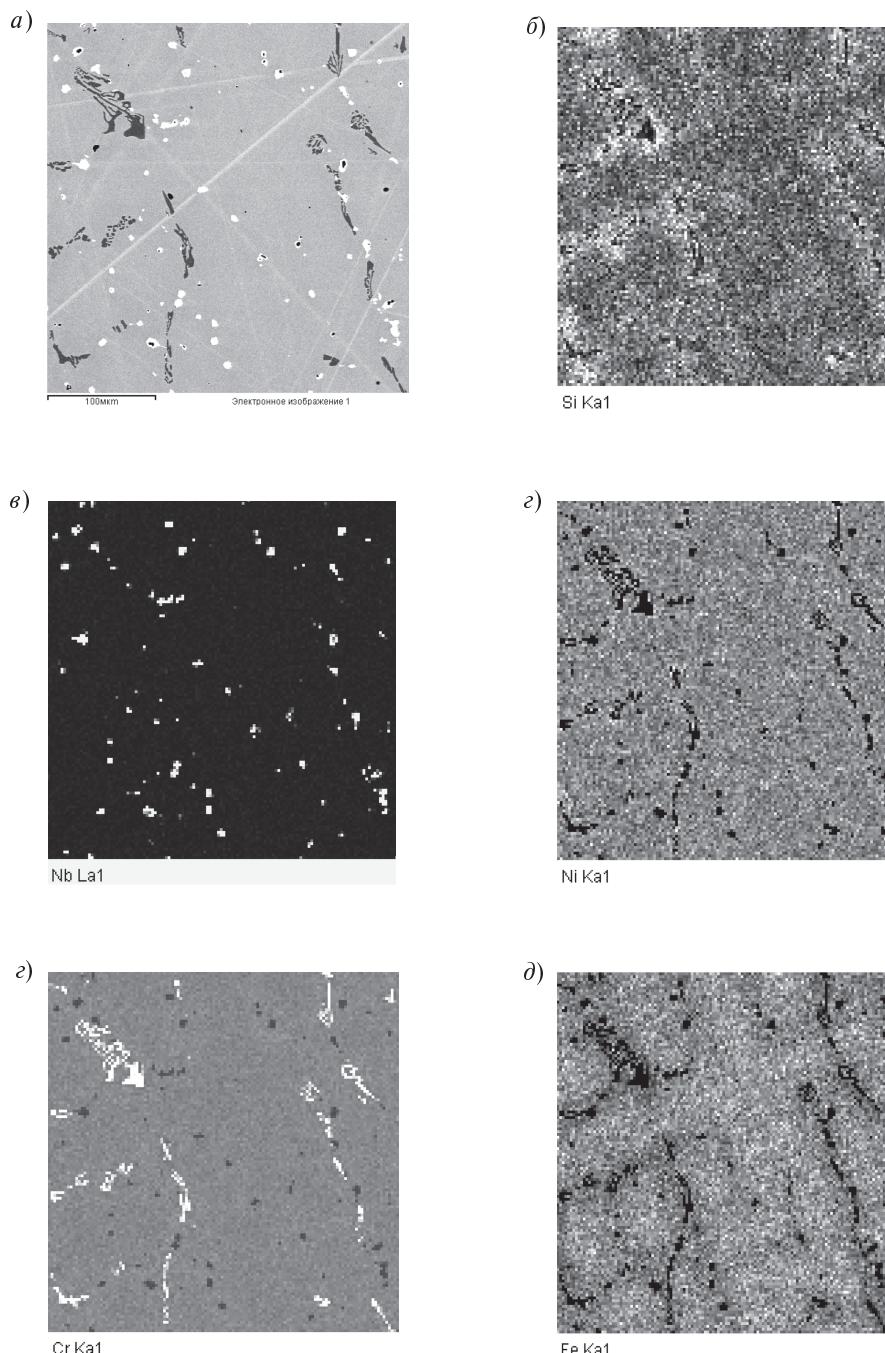


Рис. 2. Структура (получено в обратно отраженных электронах) (*a*)
и распределение кремния (*б*), ниobia (*в*), никеля (*г*), хрома (*д*)
и железа (*е*) в литом сплаве 45Х26Н33С2Б2

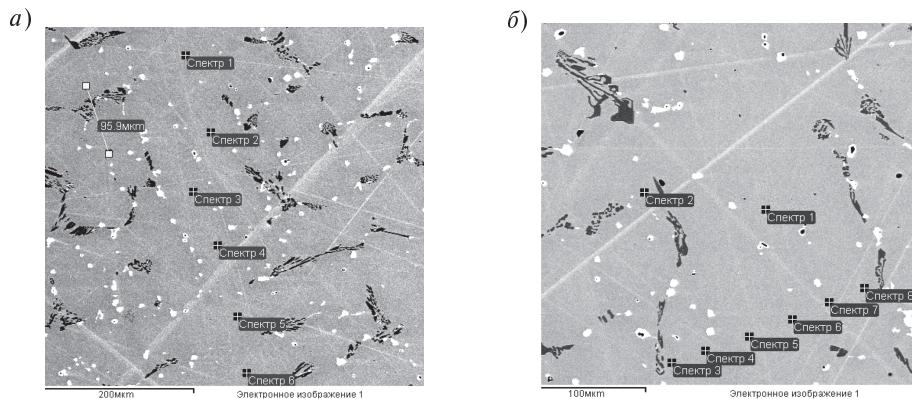


Рис. 3. Схема определения состава твердого раствора в различных участках вдоль (а) и поперек (б) оси дендрита I порядка в структуре литого сплава 45Х26Н33С2Б2

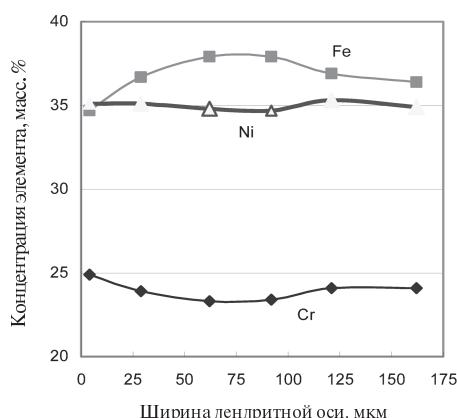


Рис. 4. Распределение Fe, Ni и Cr поперек оси первого порядка

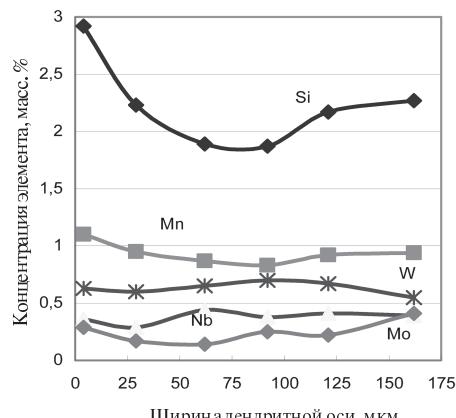


Рис. 5. Распределение Si, Mn, W, Nb и Mo поперек оси первого порядка

Таблица 1

Статистические результаты микрорентгеноспектрального анализа

Направление	Показатель	Значения показателей для разных элементов							
		Si	Mn	Ni	Fe	Cr	Nb	Mo	W
Вдоль оси I	x_{cp}	1,93	0,88	34,81	37,74	23,39	0,42	0,19	0,65
	s_1	0,09	0,04	0,13	0,35	0,15	0,07	0,07	0,05
	$F_{1-2}/F_{табл}$	0,35	—	—	0,43	—	0,30	0,48	—
	$F_{1-3}/F_{табл}$	—	—	—	0,28	—	0,30	—	—
Вдоль оси I	x_{cp}	1,94	0,87	34,82	37,75	23,36	0,40	0,20	0,64
	s_2	0,06	0,04	0,18	0,21	0,22	0,05	0,04	0,10
	$F_{2-1}/F_{табл}$	—	0,15	0,30	—	0,36	—	—	0,63
Поперек оси I	x_{cp}	2,17	0,92	34,93	36,84	23,76	0,38	0,26	0,64
	s_3	0,37	0,09	0,26	0,26	0,74	0,05	0,09	0,05
	$F_{3-1}/F_{табл}$	2,64	0,79	0,63	—	2,93	—	0,26	0,16

Окончание табл. 1

Направление	Показатель	Значения показателей для разных элементов							
		Si	Mn	Ni	Fe	Cr	Nb	Mo	W
Вдоль оси II	x_{cp}	2,00	0,92	34,85	37,57	23,41	0,36	0,22	0,68
	s_4	0,15	0,06	0,16	0,60	0,27	0,08	0,06	0,07
	$F_{4-}/F_{\text{табл}}$	0,43	0,35	0,24	0,46	0,51	0,20	—	0,31

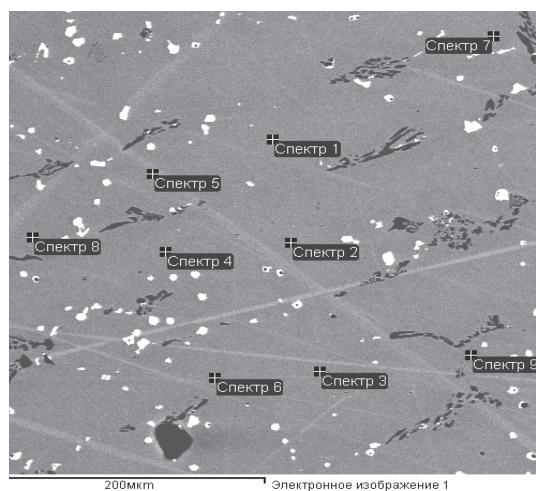


Рис. 6. Схема междендритных пространств и осей дендритов в структуре литого сплава 45Х26Н33С2Б2

Таблица 2

**Химический состав междендритных пространств и осей дендритов
в структуре литого сплава 45Х26Н39С2Б2**

Номер спектра на рис. 6	Участок структуры	Содержание элементов, масс. %							
		Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Nb	Mo	W
1	Ось I	1,83	23,07	0,86	38,16	34,65	0,46	0,29	0,67
2	Ось I	1,88	23,19	0,83	37,94	34,87	0,34	0,18	0,77
3	Ось I	2,06	23,57	0,93	37,46	34,97	0,22	0,17	0,61
4	Ось II	1,90	23,30	0,93	37,85	34,65	0,46	0,24	0,66
5	Ось II	2,05	23,40	0,83	37,77	34,79	0,36	0,14	0,66
6	Ось II	2,02	23,50	0,96	37,46	34,99	0,30	0,15	0,61
7	Межосн. пр-во	2,53	24,51	0,95	35,55	35,03	0,34	0,32	0,76
8	Межосн. пр-во	2,47	24,39	0,99	35,34	35,05	0,38	0,29	0,79
9	Межосн. пр-во	2,75	24,97	1,05	35,02	34,59	0,45	0,40	0,77



Исследования показали, что Nb и Ti образуют самостоятельные фазы, присутствующие в литой структуре сплава в виде отдельных включений неправильной формы максимальным размером до 15 мкм. Установлено, что такие включения состоят из двух самостоятельных фаз, причем, как правило, в центре «двойного» включения находится нитрид титана, вокруг которого располагается карбид ниобия (рис. 8, 9 и табл. 4, 5). Включения титана содержат до 65 масс. % Ti, а включения ниobia — до 85 масс. % Nb.

Полученные экспериментальные данные позволяют предположить, что при кристаллизации сплава 45Х26Н33С2Б2 соединения титана образуются первыми, являясь в дальнейшем зародышами, на которых формируются карбиды ниобия. При этом образующиеся «двойные» включения распределяются в структуре сплава достаточно равномерно, располагаясь как в austenите, так и в участках эвтектики. Возможно, карбиды ниобия образуются на нитридах титана и при более низких температурах, а также на других частицах.

При высокой температуре (1100–1200 °C) и длительном времени эксплуатации (более 100 часов) в сплавах с карбидным упрочнением типа 40Х25Н20С2 ускоряются процессы растворения карбидов (Me_{23}C_6 , TiC, NbC) и начинаются процессы образования интерметаллидов $(\text{NiFeCr})_m(\text{Me})_n$ [8]. Для сплава 45Х26Н33С2Б2 к группе металлов, способных образовывать интерметаллиды, могут относиться вольфрам, молибден, ниобий, кремний. Условия растворения карбидов и роста интерметаллидов определяются термодинамикой взаимодействия частиц с γ -фазой, состоящей на 95 % из железа, никеля и хрома. Кинетика процессов растворения и роста частиц лимитируется диффузией образующих их элементов замещения [9]. Коэффициент диффузии элементов замещения, например, хрома при температуре 1200 °C оценочно может быть принят $D = 5 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}$. Тогда оценка плоской диффузионной зоны с интенсивными потоками вещества определяется величиной критерия Фурье для диффузии $F_0 = \frac{D\tau}{\delta^2} \geq 1$, откуда $\delta \leq \sqrt{D\tau}$.

Таким образом, глубина диффузионной зоны с интенсивными потоками вещества при температуре 1200 °C и выдержке $\tau = 100$ час = = 360000 с составляет $\delta = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ см} = 42 \text{ мкм}$,

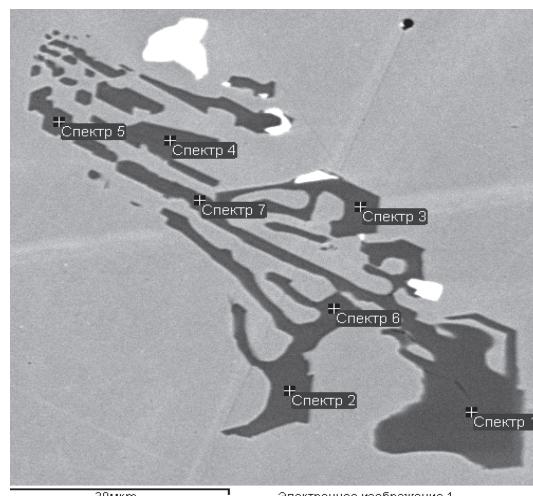


Рис. 7. Схема карбидной эвтектики в структуре литого сплава 45Х26Н33С2Б2

Таблица 3

**Химический состав карбидной эвтектики
в структуре литого сплава 45Х26Н33С2Б2**

Номер спектра на рис. 7	Содержание элементов, масс. %						
	C	Cr	Fe	Ni	Mo	W	V
1	5,88	79,36	7,15	5,28	0,73	1,39	0,21
2	5,83	79,77	7,08	5,13	0,67	1,36	0,16
3	5,30	78,71	7,54	6,56	0,47	1,27	0,15
4	5,40	78,69	7,74	6,15	0,55	1,27	0,20
5	5,47	77,07	8,57	6,75	0,51	1,43	0,20
6	5,30	77,35	8,79	6,44	0,48	1,44	0,20
7	5,41	78,29	7,94	6,24	0,55	1,34	0,23

или 1–2 толщины границы между ветвями дендрита. Следовательно, при термическом воздействии в структуре сплава 45Х26Н33С2Б2 возможен процесс растворения карбидов и роста интерметаллидов.

Полученные результаты исследования позволяют заключить, что структура сплава 45Х26Н33С2Б2 в литом состоянии содержит: γ -твердый раствор с грубой дендритной ликвацией и неоднородным распределением кремния, хрома, железа, марганца; эвтектические колонии карбидов Me_xC_y с неоднородным распределением основного элемента — хрома; включения, состоящие из нитрида титана и карбида ниobia.

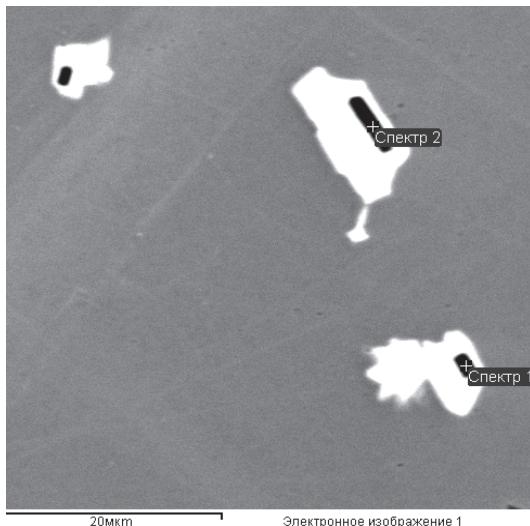


Рис. 8. Схема включений нитрида титана в структуре литого сплава 45Х26Н33С2Б2

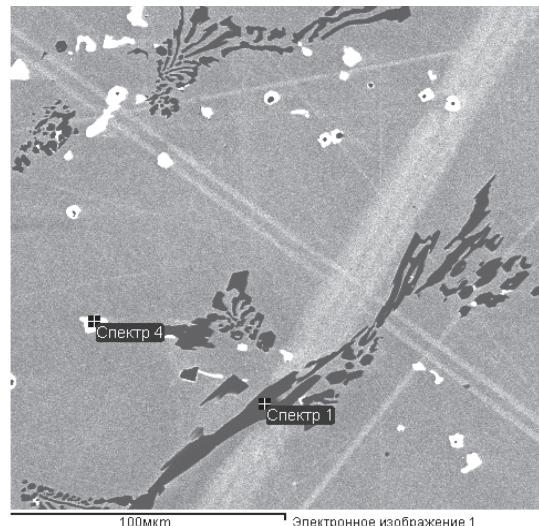


Рис. 9. Схема включения карбида ниобия в структуре литого сплава 45Х26Н33С2Б2

Таблица 4

Химический состав включений нитрида титана в структуре литого сплава 45Х26Н33С2Б2

Номер спектра на рис. 8	Содержание элементов, масс. %						
	N	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Nb
1	26,93	51,68	5,28	0,89	0,71	0,55	13,96
2	22,08	56,05	6,29	0,53	2,97	2,36	9,72

Выполненный анализ химической микронеоднородности в литом сплаве 45Х26Н33С2Б2 показал, что элементы, образующие твердые растворы замещения, — кремний, марганец и хром — обогащают приграничные объемы дендритных ветвей первого и второго порядка. Вследствие этого и неизбежной ликвации углерода на границах дендритных ячеек образуется эвтектика ($\gamma + \text{Me}_x\text{C}_y$), в карбидной составляющей которой по данным анализа содержится (в масс. %): 74–80 Cr; 7–9 Fe; до 9 Ni; 1,3–1,5 W; 0,5–0,7 Mo и 0,2 V. Соотношение структурных составляющих в сплаве (в объемн. %): 65–70 — γ -фаза; 30–35 — карбидная фаза, присутствующая в эвтектике (предположительно, Me_{23}C_6) и в виде изолированных включений (карбиды ниobia).

Карбидная фаза в структуре исследованного сплава может образовываться в процессе кристаллизации и при охлаждении вблизи температуры

Таблица 5

Химический состав включений карбида ниобия в структуре литого сплава 45Х26Н33С2Б2

Номер спектра на рис. 9	Содержание элементов, масс. %					
	C	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb
Спектр 4	11,40	0,86	1,09	0,68	0,67	85,30

такой солидуса как составная часть образующейся эвтектики или из γ -фазы (как, например, для карбидов ниobia).

Выявленные особенности литой структуры исследованного сплава свидетельствуют о ее термодинамической нестабильности при рабочих температурах и интенсивности диффузионных потоков химических элементов, образующих твердые растворы замещения. Такая структура будет проявлять неустойчивость при температурах эксплуатации змеевиковых систем высокотемпературных установок нефтехимических производств — 1100–1200 °C.

Для оценки работоспособности сплава 45Х26Н33С2Б2 необходимо исследовать природу и кинетику его структурных изменений при длительных выдержках в интервале рабочих температур. Это является задачей следующего этапа работы.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орыщенко, А.С. Разработка жаростойких сплавов для элементов конструкции радиантной части змеевиков высокотемпературных установок нефтесинтеза [Текст] / А.С. Орыщенко // Вопросы материаловедения.— 2006. № 1 (45).— С. 147–159.
2. Орыщенко, А.С. Влияние изменения микроструктуры при температурах 800–1100 °C на характеристики жаропрочности сплава 45Х26Н33С2Б2 [Текст] / А.С. Орыщенко, Ю.А. Уткин // Вопросы материаловедения.— 2009. № 3.— С. 17–25.
3. Рыбин, В.В. Влияние легирования и способов получения литых изделий на механические свойства и структуру жаростойких сталей и сплавов [Текст] / В.В. Рыбин, А.С. Орыщенко, Ю.А. Уткин, Н.Б. Одинцов // Вопросы материаловедения.— 2004. № 3 (39).— С. 5–19.
4. Анастасиади, Г.П. Формирование химической микро-неоднородности в литейных сплавах [Текст] / Г.П. Анастасиади.— СПб.: Политехника, 1991.— 148 с.
5. Бокштейн, С.З. Структурная стабильность конструкционных материалов [Текст] / С.З. Бокштейн, С.Т. Кишкин, Р.Е. Шалин // Сб.: Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков.— М.: Изд-во ВИАМ, 1994.— С. 547–553.
6. Гудцов, Н.Т. Влияние ванадия на свойства железо-хромо-никелевого сплава с 12 % хрома и 35 % никеля [Текст] / Н.Т. Гудцов, Т.С. Марьинская // Сб.: Исследования по жаропрочным сплавам. Т. IX.— М.: Изд-во АН СССР, 1957.— С. 3–9.
7. Орыщенко, А.С. Конструкционные материалы для радиантных змеевиков высокотемпературных установок нефтехимического комплекса [Текст] / А.С. Орыщенко // Металлург. 2008.— № 2.— С. 66–68.
8. Масленков, С.Б. Стали и сплавы для высоких температур [Текст]: Справочник в двух книгах. Кн. 1 / С.Б. Масленков, Е.А. Масленкова.— М.: Металлургия, 1991.— 384 с.
9. Анастасиади, Г.П. О росте частиц новой фазы, лимитируемом диффузией одного компонента [Текст] / Г.П. Анастасиади // Физика металлов и металловедение.— 1979. Т. 47. Вып. 3.— С. 654–656.

УДК 669.33

И.О. Попов, Ю.А. Митрофанов

НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭГИРИНОВОГО КОНЦЕНТРАТА — ТЕХНОГЕННОГО ОТХОДА ОАО «АПАТИТ» В КАЧЕСТВЕ КОМПЛЕКСНОГО ФЛЮСА В ПИРОМЕТАЛЛУРГИИ МЕДИ

В современных плавильных пирометаллургических процессах получения меди из первичного и вторичного сырья широко применяются в качестве флюсов природные высококремнеземистые вещества, или кварцевые флюсы — КФ. Их основу составляет свободный и связанный в сложные силикаты диоксид кремния. Стоимость производства КФ, а также масштабы их отрицательного воздействия на окружающую среду влияют на конечную стоимость флюса. С помощью КФ реализуются главные плавильные технологии медного производства: разнообразные типы плавок на медный штейн (сульфид-

ные и смешанные медные руды и концентраты); конвертирование медных штейнов и расплавов вторичной меди на черновую медь; огневое рафинирование черновой меди [1–4, 7].

Выполненные с середины прошлого века комплексные исследования макрокинетических закономерностей плавок в производстве меди выявили ряд особенностей и ограничений, связанных с использованием в этом процессе КФ. К недостаткам использования КФ в данных технологиях можно отнести следующее:

сравнительно высокую температуру плавления КФ, которая близка к температуре плавле-

ния чистого диоксида кремния, и, как следствие, низкую массовую скорость образования первичных шлаков, растворения в них окисленных металлов медного сырья и получения конечных шлаков;

сравнительно высокую температуру ликвидуса и вязкость получаемых конечных силикатных медных шлаков, а как следствие, высокую долю содержащейся в них меди (механические потери);

ограниченную растворимость в наводимых шлаках ряда тугоплавких оксидов примесных металлов;

относительно низкую скорость массообмена и химических превращений компонентов шихты в ванне печи (из-за повышенной температуры плавления и вязкости шлаков);

затраты на добычу и подготовку к плавке КФ, ухудшение экологии в местах карьерных разработок и добычи КФ.

Научные и практические основы применения эгиринового концентрата в качестве комплексного флюса в пирометаллургии меди

В последние годы на кафедре теоретических основ металлургии цветных металлов СПбГПУ исследовалась возможность использования хибинского эгиринового концентрата (ЭК) в качестве флюса в основных плавильных процессах металлургии меди с целью улучшения их основных технико-экономических показателей (при частичной или полной замене традиционного КФ). Характеристики ЭК — техногенного отхода ОАО «Апатит», выделяемого из хвостов переработки апатито-нефелиновых руд [6], — следующие (по данным ОАО «Апатит»):

Химический состав эгиринового концентрата

<i>Оксиды</i>	<i>Содержание, % масс.</i>
SiO_2	44,00–46,00
Fe_2O_3	15,50–17,50
FeO	8,00–10,50
Na_2O	6,20–7,80
K_2O	0,70–1,20
CaO	7,20–9,00
TiO_2	4,50–9,00
P_2O_5	0,50–1,30
Al_2O_3	1,50–3,60
V_2O_5	0,00–0,20

MnO	0,80–1,80
MgO	2,00–3,00
Прочие $\text{F}^{-1}, \text{Cl}^{-1}$	0,10–0,20
Влажность H_2O	0,20–0,40

Минералогический состав эгиринового концентрата

<i>Минералы</i>	<i>Содержание, % масс.</i>
Эгирин $\text{NaFe}[\text{Si}_2\text{O}_6]$	75,00–85,00
Нефелин $\text{KNa}_3[\text{AlSiO}_4]_4$	4,00–9,00
Ильменит FeTiO_3	3,00–8,00
Сфен $\text{CaTi}[\text{SiO}_4](\text{O}, \text{OH}, \text{F})$	3,50–6,00
Апатит $\text{Ca}_{10}[\text{PO}_4]_6(\text{F}, \text{OH})_2$	12,0–3,70
Титаномагнетит $(\text{FeFe}_2\text{O}_4 \cdot \text{Fe}_2\text{TiO}_4)^+$ $+ (\text{FeFe}_2\text{O}_4 \cdot \text{FeTiO}_3)$	0,80–4,50
Микроклин $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	0,30–1,00
Гидрослюды $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \times n\text{H}_2\text{O}$	0,50–1,00
Лепидомелан $\text{KFe}_3[(\text{Al}, \text{Fe})\text{Si}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$	0,30–0,50
Полевые шпаты	0,3–1,0
Прочие	0,5–1,5

Методика комплексного исследования включала научное и экспериментальное обоснование (в лабораторных и промышленных условиях) возможности применения ЭК в качестве компонента комплексного флюса для ряда основных технологий медного производства (огневое рафинирование, конвертирование, плавка на штейн, обеднение шлаков).

Особенность вещественного состава ЭК как комплексного флюса для металлургии меди. Основными компонентами ЭК служат природные минералы, содержащие оксиды щелочных металлов (натрия и калия) и кремния: эгирин — $\text{NaFe}[\text{Si}_2\text{O}_6]$; кристаллически связанный с ним в определенных соотношениях нефелин — $\text{KNa}_3[\text{AlSiO}_4]_4$; гидрослюды; микроклин и лепидомелан. Кроме того, ЭК содержит оксиды двух- и трехвалентного железа (эгирин, ильменит, титаномагнетит), оксиды кальция (сфен) и в примесных количествах другие минералы (см. приведенный выше состав) [1]. Таким образом, состав ЭК включает широко известные и применяемые в качестве флюсов в разных процессах металлургии меди оксиды: SiO_2 , CaO , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O . Поэтому ЭК можно отнести к ком-



плексному флюсу, служащему для полной или частичной замены традиционно используемых минеральных веществ: кварцита, известняка, железной руды, соды, поташа и др.

Плавкость ЭК в основном обусловлена его природным вещественным составом: сравнительно высоким содержанием в нем оксидов натрия и калия (суммарно на уровне 6,9–9,0 % по массе), определенным соотношением в нем оксидов щелочных металлов, кремния и железа. В эгирине ионы натрия находятся между основаниями призм тетраэдров силикатных комплексов и этим ограничивают их пространственные размеры. Это обуславливает уменьшение в ЭК по сравнению с КФ энергии связи силикатных комплексов, сокращение их пространственных размеров, увеличение подвижности и плавкости.

Начальная температура плавления ЭК в первом приближении соответствует температурам плавления отдельных более легкоплавких силикатных эвтектик натрия и калия. Последние по данным бинарных диаграмм состояния для эвтектик $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ и $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ соответственно составляют примерно 800 °C и 765 °C. В КФ, как известно, легкоплавкие компоненты практически отсутствуют. По результатам проведенных нами измерений температура ликвидуса ЭК для семи изученных его проб (от разных рядовых промышленных партий ЭК) составила 1140–1155 °C, что близко к известным данным, ранее полученным ОАО «Апатит» и КНЦ РАН. По сравнению с КФ (температура ликвидуса около 1680–1720 °C) ЭК, очевидно, можно отнести к легкоплавкому силикатному флюсу. Таким образом, по плавкости ЭК значительно превосходит КФ, и его плавление в металлургических печах при реальных температурах (1200–1350 °C) основных медеплавильных процессов в ванне печи характеризуется образованием жидкого расплава первичного шлака на основе ЭК. При этом, в отличие от КФ, исключается длительный период взаимодействия кремнезема в ванне печи для наведения в ней первичных шлаков.

Плотность ЭК по данным ОАО «Апатит» равна 3,25–3,6 г/см³, что существенно ниже, чем плотность твердой (при 20 °C) и расплавленной меди (соответственно 8,94 и 7,96 г/см³), а также медных штейнов. Плотность последних, как известно, в зависимости от соотношения

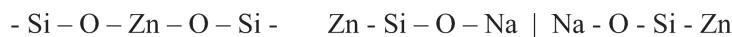
в них основных компонентов — сульфидов меди (Cu_2S) и железа (FeS) — находится (в первом приближении) в интервале значений плотностей расплавов данных сульфидов (соответственно 5,7 и 4,8 г/см³).

Основы снижения температуры плавления и вязкости шлаков медного производства при использовании в качестве флюса ЭК. Особенность состава ЭК как легкоплавкого флюса — содержание в нем в определенном химически связанном виде (эгирин, нефелин и другие минералы) оксидов натрия и калия. Оксиды щелочных металлов, как известно, способны эффективно снижать температуру плавления и вязкость традиционных и тугоплавких силикатных шлаков медного производства, содержащих повышенное количество Fe_3O_4 , ZnO , MgO , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , NiO , CoO , TiO_2 и др., в результате модифицирования ими структуры — трехмерной сетки силикатных шлаковых расплавов — с образованием новых уменьшенных структурных единиц силикатов (см. рис. 1) и двухмерных комплексов [2, 4]. Последнее приводит к увеличению подвижности силикатных комплексов и соответственно к снижению их вязкости.

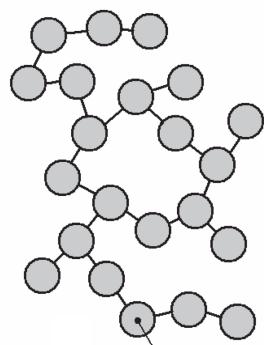
Вероятный механизм снижения температуры плавления и вязкости рядовых и тугоплавких шлаков медного производства при загрузке и расплавлении в них ЭК связан с изменением их силикатной структуры оксидами щелочных металлов, образованием более легкоплавких натрий- или калийсодержащих силикатных соединений и относительно более легкоплавких (по сравнению с тугоплавкими оксидами Fe_3O_4 , ZnO и др.) новых химических соединений (ферритов — $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{K}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, цинкатов — $\text{ZnO}\cdot\text{Na}_2\text{O}$, $\text{ZnO}\cdot\text{K}_2\text{O}$ и др.) [1, 4].

Например, предлагаемое изменение структуры тугоплавкого силиката цинка (A) с образованием двух комплексов (A) и (B) с меньшей температурой плавления и вязкостью показано на рис. 1 [1].

Важное свойство ЭК, как уже отмечено, — это возможность снижения с его помощью вязкости шлаков медного производства. Уменьшение вязкости шлаковых систем способствует увеличению скорости осаждения полидисперсных частиц жидкого медного сплава (сульфидные и металлические) в донный (основной) продукт плавки, увеличивает подвижность ионов



(A)



Единичный силикатный комплекс

(B)

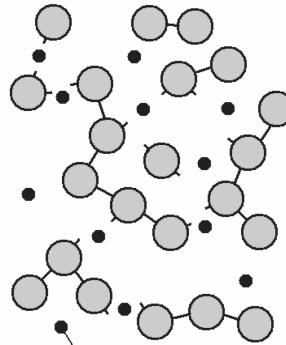
Na⁺ или K⁺

Рис. 1. Изменение трехмерной структуры силикатных комплексов (А) оксидами щелочных металлов (В)

в расплаве и соответственно массовую скорость химических реакций в ванне печи.

Рассмотрим физико-химические основы снижения вязкости и механических потерь меди со шлаками при использовании флюсов, снижающих температуру расплавления (ликвидус) шлаков. К этой категории флюсов относится ЭК.

Скорость движения (по вертикали) в расплавленных шлаках жидких частиц медных сплавов (металлические или сульфидные) описывается в первом приближении уравнением Стокса (1), которое включает ряд важных для оптимизации металлургических процессов параметров:

$$V_c = \frac{k_1(\rho_1 - \rho_2)r^2 g}{\eta}. \quad (1)$$

Здесь V_c — скорость осаждения частиц сплава, см/сек; ρ_1 и ρ_2 — плотности сплава и шлака, г/см³; η — вязкость шлака, пуз; r — радиус частиц, см; g — ускорение силы тяжести, г/см·сек²; k_1 — коэффициент формы, равный 2/9 для шарообразных частиц.

Значение скорости осаждения в шлаковом расплаве металлической и сульфидной жидкой частицы сплава (обозначена далее в тексте «второй» фазой) определяется по формуле (1) с учетом вязкости η гетерогенной жидкости, состоящей из жидкой фазы шлака — «ш» — и расплавленной

частицы сплава — «сп», обладающих разной вязкостью (соответственно $\eta_{ш}$ и $\eta_{сп}$). Численное значение η гетерогенного раствора медного шлака, содержащего «вторую» фазу, находится экспериментально или расчетно по справочным данным с учетом известных эмпирических приближенных соотношений для определения вязкости двухфазной гетерогенной жидкости.

Шлаковые расплавы медного производства нередко содержат также «третью» фазу. Она образуется при ограниченной растворимости тугоплавких веществ в шлаковых расплавах, в частности оксидов — Fe₃O₄, ZnO, Al₂O₃, CaO и др., а также химических соединений на их основе, и представляет собой диспергированные в шлаке твердые или жидкие частицы, например в виде твердых кристаллов шпинельной структуры или частиц оксидного расплава, образующегося при расслоении шлака на две жидкости. Образование в шлаках «третьей», более тугоплавкой фазы, особенно кристаллов твердой фазы, увеличивает вязкость шлаковых расплавов. О чём, в частности, свидетельствует известное установленное Эйнштейном правило, по которому вязкость гетерогенных растворов с увеличением содержания в них твердых частиц значительно возрастает и определяется по формуле $\eta = \eta_0(1 + 2,5\Psi)$, где η_0 — вязкость исходной, гомогенной жидкости; Ψ — отношение объема диспергированных кристаллов к общему объему жидкости.



Зависимость вязкости жидкости от температуры T , установленная Френкелем, имеет вид

$$\eta = B_1 e^{E/RT}, \quad (2)$$

где B_1 — коэффициент, зависящий от состава, постоянный для определенных жидкостей; E — энергия активации вязкого течения жидкости, ккал/моль.

Экспоненциальный вид зависимости (2) свидетельствует о сильном и нелинейном влиянии температуры жидкости на ее вязкость. По практическим данным наибольшее относительное уменьшение вязкости разных по составу и плавкости силикатных жидких шлаков медного производства наблюдается при превышении их температуры над точкой ликвидуса (всего на несколько десятков градусов). А при превышении температуры шлаков над точкой ликвидуса на первые сотни градусов их вязкость практически нивелируется: снижается до долей пуаз независимо от исходного состава и плавкости шлака. В этой связи большое значение для снижения механических потерь меди со шлаками имеют два параметра металлургического процесса: температура расплава шлака в печи ($T_{ш}$) и температура ликвидуса шлака ($T_{л}$). От разницы данных температур при неизменном составе шлака зависит величина вязкости шлака.

Указанная общая качественная закономерность влияния температуры шлакового расплава на его вязкость имеет физико-химическое объяснение. Действительно, вязкость шлаков η , а также значение энергии активации вязкого течения E в соответствии с природой вязкого течения жидкостей сильно зависят от подвижности ионов расплава, степени их взаимной связи и, соответственно, от превышения в ванне печи температуры шлака над температурой его ликвидуса.

С учетом изложенных выше положений предложена эмпирическая формула (3), устанавливающая зависимость вязкости шлака η от превышения температуры ликвидуса шлаков:

$$\eta = B_2 / F(\delta), \quad (3)$$

где B_2 — коэффициент; F — функция; $\delta = (T_{ш} - T_{л})$.

При подстановке выражения (3) в (2) получено уравнение: $B_2/F(\delta) = B_1 e^{E/RT}$. В результате его решения определены значения B_2 и $F(\delta)$:

$$B_2 = B_1; \quad F(\delta) = 1/e^{E/RT}. \quad (4)$$

Соответственно, $F(\delta)$ зависит от энергии активации вязкого течения шлака E и $T_{ш}$, а B_2 , как и B_1 в формуле (2), является функцией состава шлака.

Подстановкой (3) в (1) установлена эмпирическая связь скорости осаждения жидкой частицы медного сплава в расплаве шлака с превышением температуры расплава шлака над точкой его ликвидуса:

$$V_c = \frac{k_1(\rho_1 - \rho_2)r^2 g F(T_{ш} - T_{л})}{B_2}. \quad (5)$$

В отличие от (1), выражение (5) свидетельствует о возможном увеличении V_c за счет снижения температуры плавления шлаков при неизменной температуре шлакового расплава в печи. Кроме того, оно не содержит в явном виде сложного для измерений и практического, в реальных процессах контроля параметра — вязкости шлака.

Лабораторные исследования применения ЭК в качестве комплексного флюса

Изучено влияние ЭК на температуру плавления (точка ликвидуса) промышленных полиметаллических шлаков медного производства, а также на остаточное содержание в них меди при расплавлении ЭК в этих шлаках.

Для испытаний использовались два вида промышленных медных шлаков: конверторный и анодный (огневое рафинирование, всего шесть образцов разных плавок) с различным содержанием в них тугоплавких оксидов (см. табл. 1).

Эксперименты проводились с шихтой, составленной из дробленого шлака (крупность 1–5 мм) и ЭК в количестве 0, 10, 20 и 30 % от массы исследуемого шлака. Плавки шихты вели в алундовых тиглях (в печи с карбидокремневыми нагревателями). Получаемый расплав шлака перегревали над точкой ликвидуса на 70–80 °C, выдерживали при данной температуре в течение примерно 20 минут, а затем охлаждали в тигле, сначала в печи до температуры 700 °C (при отключенной токовой нагрузке), а затем вне печи — на воздухе. Для сравнения свойств ЭК и КФ (влияния на плавкость получаемых шлаков и извлечения меди в донный — медный сплав)

Таблица 1

Составы полиметаллических шлаков

a) конверторные шлаки

Оксиды	Шлак № 1 (черный)	Шлак № 2 (черный, темно-серый)	Шлак № 3 (темно- коричневый)	Шлак № 4 (светло- коричневый)
SiO_2	19,83	18,37	18,41	24,48
Fe_2O_3	21,98	25,31	6,32	2,47
FeO	10,14	11,48	14,51	21,84
Al_2O_3	8,15	7,91	2,65	11,1
CaO	6,91	7,4	5,3	6,53
MgO	2,2	1,84	3,24	2,47
NiO	0,24	0,34	1,8	1,36
ZnO	25,9	23,1	18,5	15,22
SnO	1,61	2,32	14,21	5,67
PbO	3,04	1,93	15,06	8,86
Сумма	100,00	100,00	100,00	100,00

б) анодные шлаки

Оксиды	Шлак № 5 (красно-коричневый)	Шлак № 6 (серо-коричневый)
Cu_2O	9,17	7,4
SiO_2	39,88	21,24
Fe_2O_3	8,46	13,85
FeO	7,62	8,31
CaO	6,12	11,68
MgO	2,44	2,98
ZnO	11,04	18,38
SnO	1,12	3,8
PbO	0,93	1,6
NiO	0,75	0,95
Al_2O_3	12,47	9,81
Сумма	100,00	100,00

дополнительно проводились плавки шихты, составленной из исходных шлаков и КФ. После разбивки тиглей определяли полный химический и рентгеноспектральный микроанализ продуктов плавки (шлак и донная — металлическая — медная фаза), составляли баланс, определяли извлечение меди в сплав. Температура ликвидуса определялась термографическим методом.

На рис. 2 приведены результаты экспериментальных измерений температуры ликвидуса образцов конверторных и анодных шлаков известного состава (см. табл. 1) при разных, указанных

выше, содержаниях в шихте ЭК. Точка ликвидуса исходных конверторных шлаков № 1, 2, 3 и 4 соответственно составила 1260, 1230, 1060 и 1050 °C. Для исходных анодных шлаков № 5 и № 6 значения температуры ликвидуса соответственно 1070 и 1130 °C.

Относительно легкоплавкие конверторные шлаки (КШ) № 3 и № 4 (см. табл. 1) содержали меньшее количество оксидов цинка и трехвалентного железа в виде магнетита по сравнению с относительно более тугоплавкими шлаками № 1 и № 2. Относительно более легкоплавкий анодный

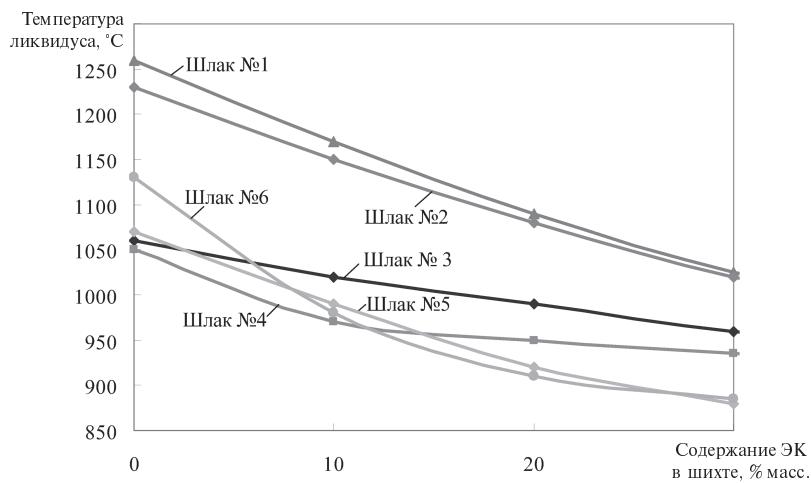


Рис. 2 Влияние флюсовой добавки ЭК на плавкость полиметаллических шлаков медного производства
(составы соответствуют таблице 1; шихта составлена из ЭК и КШ или ЭК и АШ)

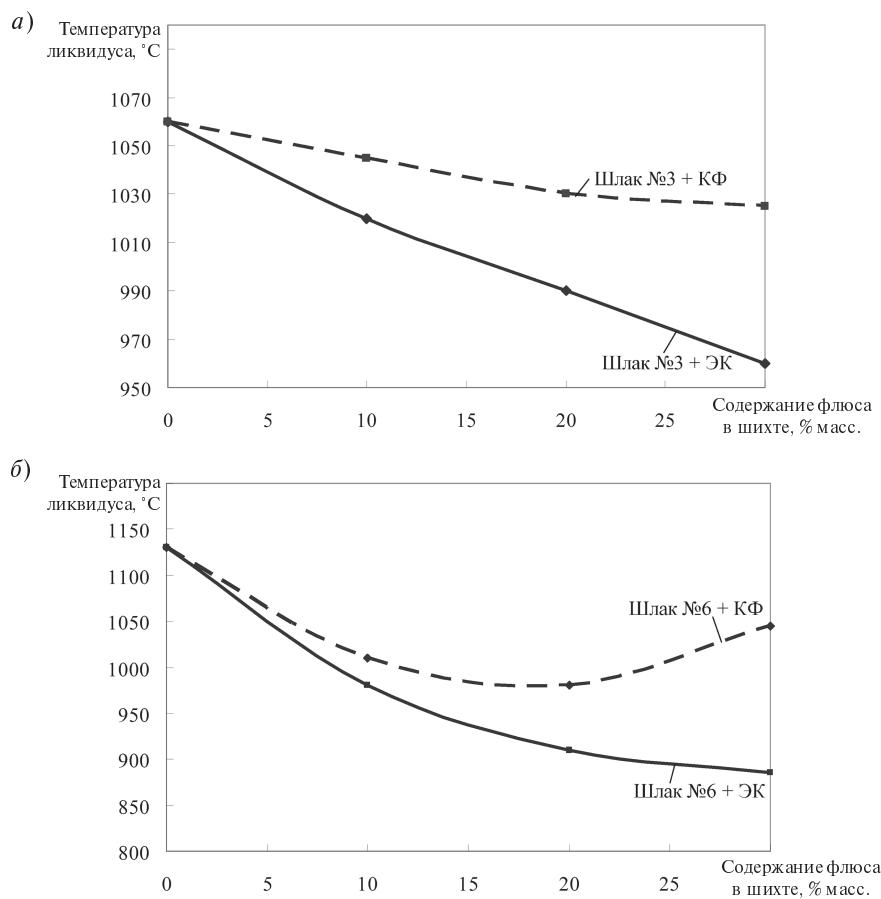


Рис. 3. Сравнительное влияние флюсовых добавок ЭК и КФ на плавкость полиметаллического конверторного (а) и анодного (б) шлаков медного производства
(состав шлаков соответствует табл. 1; шихта составлена из ЭК и КШ или КФ и КШ (а), из ЭК и АШ или КФ и АШ (б))

шлак (АШ) № 5 также содержал меньшее количество оксидов трехвалентного железа и цинка в сравнении с более тугоплавким шлаком № 6 (см. табл. 1).

На рис. 3, а, б даны для сравнения результаты экспериментальных измерений температуры ликвидуса шихт, составленных из образцов конверторного и анодного шлаков с ЭК и КФ.

На основе анализа и обобщения полученных экспериментальных данных по повышению плавкости полиметаллических конверторных и анодных шлаков медного производства установлено следующее:

увеличение загрузки ЭК в шлаки (до 30 % по массе в шихте) приводит к устойчивому нелинейному снижению температуры плавления исходных шлаков. При этом, как видно из рис. 2, ЭК более эффективно снижает температуру ликвидуса шихт, содержащих относительно более тугоплавкие конверторные и анодные шлаки;

ЭК значительно более эффективен в сравнении с КФ в плане снижения температуры ликвидуса конверторных и анодных шлаков (рис. 3, а, б);

устойчивое повышение извлечения меди (до 50 %) в донную — металлическую — фазу медного сплава (и обеднение шлаков по содержанию меди) при увеличении до 30 % по массе содержания ЭК в шихтах со шлаками.

Промышленные испытания применения ЭК в качестве комплексного флюса в процессах окислительного рафинирования меди

Проведены длительные промышленные испытания огневого рафинирования черновой и вторичной меди с использованием в качестве флюса шихты, состоящей из смесей ЭК и КФ (в виде кварцевого песка содержащего около 92 % SiO_2) с разным содержанием ЭК в общей массе флюса: 0; 15–17; 21–29; 45–50 и 95–100 % масс. Исследование велось на анодной печи МЕРЦ (емкость ванны по меди ~ 180 тонн) непрерывно в течение 28 суток. Загрузка флюсовой смеси составляла 1,5–2,0 % от массы рафинируемой меди. Временные этапы испытаний различались в основном указанным выше уровнем содержания ЭК во флюсовой смеси.

Загружаемые в плавку материалы — черновая и вторичная медь, а также основные получаемые продукты — рафинированная (анодная) медь и скачиваемый (анодный) шлак каждого

ковша опробовались (для определения полного химического состава продуктов) и взвешивались. После расплавления всех загруженных в печь материалов осуществлялись: продувка расплава меди воздухом через боковые фурмы; скачивание шлака; продувка ванны через те же фурмы природным газом; розлив анодной меди в изложницы. По этапам испытаний фиксировали состав и количество образующихся пылей (с рукавных фильтров газоочистки), составляли материальный баланс плавок. В жидкой ванне печи (по ходу плавки) и при сливе шлака с помощью термопары погружения измеряли температуру расплавов шлака. Вели хронометраж технологических операций. Другие режимные параметры плавки фиксировали и поддерживали на одном уровне. Состав перерабатываемого медного сырья характеризовался таким рядовым соотношением: черновая (после конвертирования) медь — 40–60 %, вторичная медь — 60–40 %. Содержание меди в загружаемом сырье составляло: более 98,5 % в черновой, более 75 % во вторичной меди (остальное — Fe, Zn, Pb, Sn, Al, Ni и другие загрязняющие примеси).

В результате промышленных испытаний указанных выше смесей флюсов определен комплексный характер свойств ЭК. Установлен нормальный ход процесса огневого рафинирования при использовании ЭК. По сравнению с КФ зафиксировано снижение температуры плавления шлаков (включая тугоплавкие), уменьшение их вязкости, возможность более глубокого рафинирования меди, снижения механических потерь меди со шлаками, повышение производительности процесса (см. далее).

Снижение температуры плавления шлаков огневого рафинирования меди. Температура шлаков, скачанных из печи МЕРЦ, при использовании ЭК во флюсах составила 1180–1215 °C, а в варианте применения КФ (без ЭК) — 1240–1300 °C; при этом с увеличением во флюсе отношения ЭК:КФ температура расплава шлаков в печи уменьшалась, поскольку достигалось эффективное их разжижение при более низких температурах ванны печи.

Увеличение жидкотекучести анодных шлаков. Количество скачанных ковшей шлака при наклоне печи (без использования ручного труда на скачивание шлака с помощью скребка) при использовании ЭК во флюсах составляло до 4 штук (всего набиралось примерно 5 ковшей), а в ва-



рианте с использованием КФ — 1 шт. Как следствие, при применении ЭК зафиксировано уменьшение временного периода скачивания шлака, а также снижение тепловых потерь при простоях печи на скачивание шлака, сокращение времени плавки и увеличение производительности печи.

Уменьшение содержания в шлаке металлического медного сплава (механических потерь меди). Приведен рациональный состав полученных с использованием ЭК анодных шлаков при огневом рафинировании меди:

Компонент	%, mass.
Cu _M +Cu ₂ O	7,85–19,77
Fe ₂ O ₃ +FeO	8,69–11,81
NiO	0,43–0,77
PbO	2,82–5,75
SnO	1,61–2,32
ZnO	3,61–7,37
SiO ₂	21,9–35,1
Al ₂ O ₃	5,4–8,7
CaO	3,1–6,0
MgO	1,2–1,7
Na ₂ O	2,1–3,1
K ₂ O	0,23–0,51

За период испытаний ЭК в смеси флюсов извлечение и среднее содержание меди в скачанные шлаки снизились по сравнению с этапом плавок с КФ (без использования ЭК). Уровень содержания меди в шлаках, полученных с использованием КФ, составил 12,3–33,6 %, что в 1,3–1,4 раза больше, чем за период плавок с ЭК. При этом методом рассева проб (с отделением корольков меди) и РСМА в шлаках плавок с ЭК установлено снижение содержания металлической фазы — сплавов на основе меди.

Испытание ЭК в качестве флюса в процессе конвертирования черновой меди из вторичного медного сырья во вращающемся тридцатитонном наклонном конверторе ТРОФ. Испытывалась флюсовая смесь ЭК и КФ с содержанием ЭК от 0 до 50 % по массе и удельной (на 1 т меди) загрузке флюса в сырье 4–5 %. Сырьем опытных плавок служила вторичная медь с содержанием Cu более 50 % масс. Кроме того, в отличие от известного процесса, из традиционной флюсовой загрузки печи исключалась тугоплавкая железная руда, которая использовалась для наведения в процессе конвертирования железистых силикатных шлаков.

В результате испытаний ЭК в качестве флюсовой добавки установлен нормальный ход про-

цесса конвертирования черновой меди из вторичного сырья. Зафиксировано улучшение ряда основных показателей конвертирования: повышение производительности печи, улучшение свойств шлаков (уменьшение температуры плавления и вязкости), снижение содержания в шлаках меди на 35–55 %, уменьшение настылеобразования на футеровке.

На способ огневого рафинирования меди с использованием ЭК в качестве флюса получен патент РФ [5].

В лабораторных и промышленных исследованиях активное участие приняли бывшие студенты — выпускники кафедры теоретических основ металлургии цветных металлов СПбГПУ — Н.Ю. Паршин и Е.А. Мельниченко.

Выполнено комплексное (теоретическое и экспериментальное) исследование по обоснованию возможности использования эгиринового концентрата — техногенного отхода ОАО «Апатит» — в качестве легкоплавкого и комплексного флюса для ряда основных процессов металлургии меди: конвертирования и огневого рафинирования вторичной меди; снижения температуры плавления и вязкости тугоплавких шлаков, содержащих повышенное количество тугоплавких оксидов (магнетита, оксидов цинка и ряда других); обеднения по содержанию меди конверторных и анодных полиметаллических шлаков медного производства.

Установлена возможность эффективного снижения в результате применения эгиринового концентрата в качестве флюса температуры плавления и вязкости конверторных и анодных шлаков медного производства, содержащих повышенное количество тугоплавких оксидов — железа, цинка и ряда других металлов; уменьшения уровня механических потерь меди с конверторными и анодными полиметаллическими шлаками; повышения производительности процесса огневого рафинирования и конвертирования вторичной меди.

Впервые в практике огневого рафинирования и конвертирования вторичной меди в промышленных условиях испытан в качестве основного флюса эгириновый концентрат. При этом установлены в целом нормальный ход процессов и улучшение ряда их основных показателей. На способ огневого рафинирования меди с использованием эгиринового концентрата получен патент РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов, И.О. Технология внутрипечного обеднения конверторных и анодных шлаков медного производства [Текст] / И.О. Попов, С.М. Устинов, Б.Н. Бутырский // Материалы XII Всеросс. конф. по проблемам науки и высшей школы.— СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2008.— С. 252–254.
2. Davenport, W.G. Extractive metallurgy of Copper (fourth edition) [Текст] / W.G. Davenport, M. King, M. Schlesinger, A.K. Biswas.— Oxford, 2002.
3. Смирнов, В.И. Металлургия меди, никеля и кобальта [Текст] / В.И. Смирнов, А.А. Цейдлер, И.Ф. Худяков, А.И. Тихонов.— М.: Металлургия, 1964.
4. Ванюков, А.В. Теория пирометаллургических процессов [Текст] / А.В. Ванюков, В.Я. Зайцев.— М.: Металлургия, 1973.
5. Патент № 2391420 Российской Федерации, МПК⁷. Способ огневого рафинирования меди [Текст] / Попов И.О., Устинов С.М., Бутырский Б.Н., Макаров А.М.— Заявлено 24.06. 2009.— № 2009124157.
6. Федоров, С.Г. Химическая переработка минеральных концентратов Кольского полуострова [Текст] / С.Г. Федоров, А.И. Николаев, Ю.Е. Брыляков [и др].— Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2003.— С. 22–26.
7. Купряков, Ю.П. Производство тяжелых цветных металлов из лома и отходов [Текст] / Ю.П. Купряков.— Харьков: Основа, 1992.

УДК 621.791.14

К.А. Охапкин

РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ

Точечная сварка трением — перспективный процесс соединения пластичных металлов в твердой фазе. Сварка в твердой фазе обладает рядом преимуществ по сравнению со сваркой плавлением (отсутствие сварочной ванны с жидким металлом, следовательно, отсутствие пор и трещин; возможность сварки разнородных металлов, не свариваемых традиционными дуговыми способами). 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).

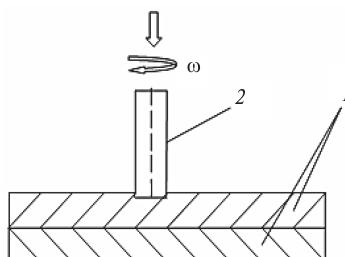


Рис. 1. Процесс точечной сварки трением

Точечная сварка трением позволяет выполнять нахлесточные соединения. Областью применения данного способа может быть электротехническая промышленность, так как он хорошо подходит для сварки электротехнических шин, которые изготавливают из цветных металлов и сплавов, обладающих хорошей пластичностью.

Сварка выполняется цилиндрическим инструментом 2, который под действием осевого усилия, вращаясь, погружается в металл верхней заготовки 1 на глубину, приблизительно равную толщине верхней заготовки, затем выдерживается в этом положении в течение некоторого времени, достаточного для образования качественного соединения (рис. 1).

В случае точечной сварки трением механическая энергия вращения инструмента, затрачиваемая на преодоление сил трения, рассеивается в форме тепла предположительно на площадках фактического контакта, которые в совокупности образуют поверхность трения. Выделяющаяся теплота затрачивается на пластифицирование прилежащих к источнику



слоев металла, что позволяет инструменту без значительного усилия углубляться в металл верхней заготовки. Однако для выбора оптимальных параметров режима процесса нужно знать достаточно ли теплоты выделяется для пластифицирования металла, каких значений достигают максимальные температуры. Возникает необходимость установления количественной зависимости мощности тепловыделения на поверхности фрикционного контакта инструмента и заготовок от конструктивно-технологических параметров режима сварки.

Существуют различные модели распространения теплоты при сварке трением, но отличительная особенность и главный их недостаток — то, что количество вводимой энергии является входным параметром модели и отсутствуют аналитические выражения, позволяющие определить мощность источника теплоты в зависимости от параметров режима сварки.

Цель настоящей работы — построение тепловой модели процесса точечной сварки трением, в которой мощность тепловыделения определяется аналитически.

При решении задачи нестационарной теплопроводности в процессе сварки необходимо знать значение мощности источника тепла в каждый момент времени и его пространственное распределение. В случае точечной сварки трением действует плоский, распределенный по линейному закону источник. Его можно представить в виде активного теплогенерирующего плоского слоя некоторой небольшой толщины. Для простоты рассмотрим неподвижный теплогенерирующий слой на поверхности верхней заготовки. Предполагается, что в случае рассмотрения подвижного источника, который с определенной скоростью погружают в заготовку, максимальные температуры не превышают значений, полученных для неподвижного, и мощность определяется по тем же выражениям, что и для неподвижного источника (при одинаковом времени действия подвижного и неподвижного источников).

Аналитическое выражение для тепловой мощности может быть получено из рассмотрения процесса тепловыделения на элементарной площадке поверхности трения. На бесконечно малой площадке размером $dS = r d\theta dr$ действует элементарная сила трения $dF = \tau_k dS$, где τ_k — контактное напряжение на поверхности взаимодействия инструмента и заготовки; r — расстояние

от оси вращения инструмента до рассматриваемой элементарной площадки. Момент этой силы относительно оси вращения — $dM = r dF$. Тепловая мощность в рассматриваемом элементе площади трения находится из выражения

$$dQ = \omega r dF = \omega r^2 \tau_k d\theta dr, \quad (1)$$

где ω — угловая скорость вращения инструмента.

Проинтегрировав (1) по всей площади фрикционного контакта инструмента и заготовки, получаем полную мощность тепловыделения:

$$Q = \int_0^{2\pi R} \int_0^r \omega \tau_k r^2 dr d\theta = \frac{2}{3} \pi \tau_k \omega R^3, \quad (2)$$

где R — радиус инструмента.

Выбор выражения для расчета контактного напряжения зависит от вида фрикционной связи инструмента и заготовки. В работе [1] показано, что в процессе сварки трением можно выделить три стадии изменения мощности, которые различны по характеру зависимости мощности от времени. Можно предположить, что этот характер связан с изменением вида фрикционной связи инструмента и заготовок и переходом от внешнего трения к внутреннему.

Из рассмотрения контактной пары трения «инструмент (материал инструмента — нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т) — заготовка (алюминиевый сплав 7075 Т6)» можно заключить, что по мере нагрева алюминиевый сплав будет разупрочняться, пластифицироваться, а сталь до температуры солидуса алюминиевого сплава будет сохранять высокие значения твердости и прочности. Следовательно, в соответствии с молекуллярно-механической теорией трения [3] в начале взаимодействия будет наблюдаться внешнее трение — упругий контакт, затем по мере нагрева алюминиевого сплава — упругопластический и, наконец, пластический. Временной интервал внешнего трения предположительно приходится на первую и вторую стадии процесса сварки. Известно, что на третьей стадии, когда наступает внутреннее трение процесса (сдвиговое сопротивление связи сталь — алюминий превышает сдвиговое сопротивление поверхностного слоя алюминия), выделяется практически вся теплота. В случае внутреннего трения принимается, что

$\tau_{\text{конт}} = \tau_t = \sigma_t / \sqrt{3}$, где τ_t — сдвиговое сопротивление материала заготовки; σ_t — предел текучести материала заготовок на растяжение.



Таким образом, выражение для нахождения мощности источника теплоты принимает вид

$$Q = \frac{2}{3} \pi \frac{\sigma_t}{\sqrt{3}} \omega R^3. \quad (3)$$

Из формулы (1) получаем выражение для вычисления удельной мощности

$$q(r) = \tau_t \omega r. \quad (4)$$

Необходимо учесть, что τ_t зависит от температуры и скорости пластической деформации (происходит наклеп поверхностного слоя заготовки, сдвиговое сопротивление увеличивается). Поэтому в процессе решения температурной задачи значение q корректируется на каждом шаге по времени с учетом распределения температур.

По данным [3] скорость пластической деформации при сварке трением превышает скорости пластической деформации статических испытаний в 3000–10000 раз. Поэтому для выполнения вычислений по формуле (4) необходимо провести испытания при повышенных скоростях пластической деформации.

Для исследования был выбран сплав 7075 — высокопрочный деформируемый алюминиевый сплав. Некоторые теплофизические и механические свойства сплава 7075 приведены в таблице.

Кроме того, из литературы [4] известна следующая зависимость сдвигового сопротивления от температуры:

Температура, °C	Сдвиговое сопротивление, MPa
28	242
150	173
200	116
300	71
350	48
400	34
425	28
450	23
475	15
500	10
531	0

Решение уравнения теплопроводности осуществлялось методом конечных элементов с использованием программного комплекса COMSOL. Сетка конечных элементов, имеющих геометрическую форму тетраэдров (рис. 2), была построена со сгущением в области действия источника. Максимальный размер наибольшей стороны тетраэдра — 0,004 м, размер в переходной области — 0,00175 м, в зоне действия источника — 0,001 м. Геометрические размеры заготовки 25×25×3 мм.

Для учета ограниченности размеров заготовки границы были приняты адиабатическими. Мощность источника теплоты, вводимая в расчетную модель, отличается от значений, рассчитанных по выражению (4). Это связано с необходимостью учета теплоотвода в инструмент, составляющего порядка 10 % общей генерируемой тепловой энергии [5]. Поэтому в расчетную модель закладывается значение мощности, равное $0,9q(r, T)$. Начальные условия устанавливают температуру заготовки 300 К. Были рассчитаны зависимости мощности от времени, максимальных температур, достигаемых в процессе сварки, от основных параметров режима — скорости вращения и диаметра инструмента.

Мощность тепловыделения. Для расчета мощности были приняты следующие параметры режима: скорость вращения инструмента — 800 об/мин; диаметр инструмента — 6 мм. На рис. 3 приведена зависимость средней по площади инструмента мощности тепловыделения от времени. По характеру зависимости видно, что от максимального значения мощность падает до некоторого установившегося значения, которое незначительно снижается с течением времени, что совпадает с характером зависимости мощности от времени на третьей стадии процесса сварки трением [1]. Наблюдаемое падение мощности согласуется с физическими закономерностями процесса: заготовка нагревается, следовательно, уменьшается сопротивление пластической деформации, а соответственно снижается момент

Теплофизические и механические свойства сплава 7075 Т6

Параметр и единицы его измерения	Значения параметра при указанной (°C) температуре			
	100	200	300	400
Теплопроводность, Вт/(мК)	139	168	176	176
Теплоемкость, Дж/(кГ·К)	277	505	759	1105
Плотность, кГ/м ³	2705	—	2664	2640

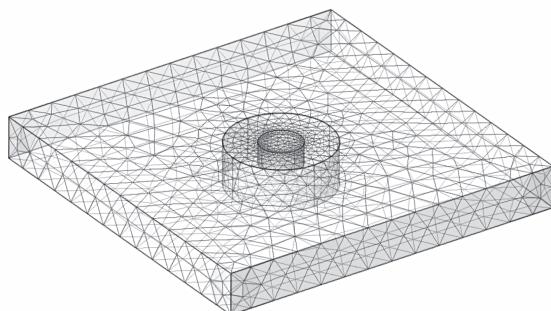


Рис. 2. Сетка конечных элементов

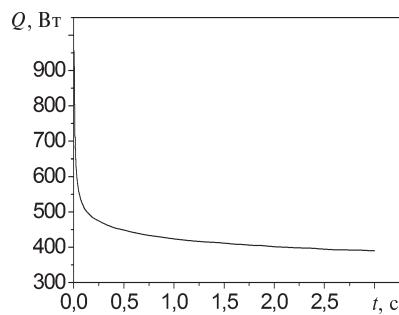


Рис. 3. Зависимость мощности тепловыделения от времени

трения и мощность тепловыделения. С течением времени процесс стабилизируется: по мере приближения к температуре солидуса сплава мощность тепловыделения снижается практически до нуля, и в точках, где достигнута нулевая мощность, идет охлаждение металла заготовки, упрочнение и соответствующее увеличение мощности тепловыделения. Так поддерживается приблизительно постоянное значение мощности на установившемся этапе процесса.

Максимальные температуры процесса. Для расчета максимальных температур в зависимости от скорости вращения инструмента принимался диаметр инструмента 6 мм. Для расчета максимальных температур в зависимости от диаметра инструмента была принята скорость вращения инструмента 800 об/мин. Из приведенных на рис. 4, а зависимостей видно: когда время действия источника составляет 3 и 4 секунды, значения максимальных температур практически не изменяются, что хорошо согласуется с данными рис. 3, где мощность приобретает установившее-

ся значение при времени действия источника около 3 с. Поэтому зависимость максимальных температур от диаметра инструмента была рассчитана при времени процесса, равном 3 с.

Расчетное изменение максимальной температуры процесса при изменении скорости вращения инструмента от 400 до 1200 об/мин составляло 109 °С, а при изменении диаметра инструмента от 4 до 12 мм — 249 °С.

Анализ максимальных температур является методом количественной оценки эффективности способов управления процессом сварки за счет диаметра инструмента и скорости вращения. При известных максимальных температурах процесса появляется возможность прогнозирования структуры и свойств сварных соединений.

Разработана методика расчетной оценки мощности тепловыделения на поверхности фрикционного контакта инструмента и заготовок. Зависимость мощности от времени, полученная по данной методике, согласуется с экспериментальными данными других исследователей, например [1].

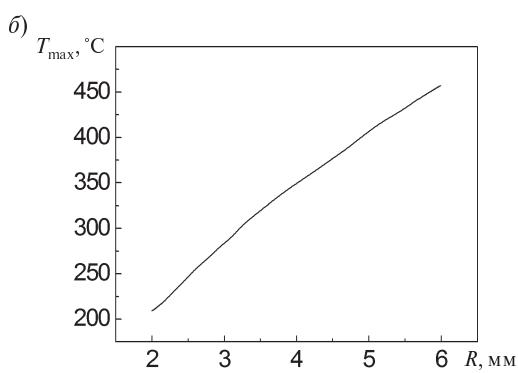
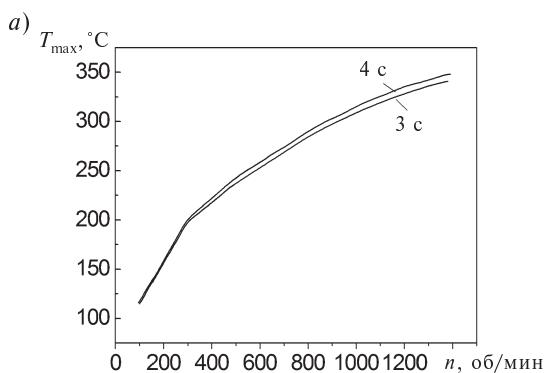
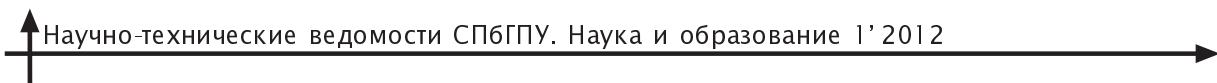


Рис. 4. Зависимости максимальной температуры от скорости вращения инструмента (а) при времени действия источника 3 и 4 с и от радиуса инструмента (б) при времени действия источника 3 с



На основе предложенной методики расчета мощности тепловыделения получено решение нестационарной задачи теплопроводности, которая служит основой для решения диффузионной, термомеханической и микроструктурной задач при сварке.

Показано, что процесс нагрева устанавливается в течение 3 с при заданных параметрах расчета.

Установлено, что изменение диаметра инструмента — более эффективный способ управления процессом сварки, чем изменение скорости вращения инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вилль, В.И.** Сварка металлов трением [Текст] / В.И. Вилль.— М.: Машиностроение, 1976.— 176 с.
2. **Серегин, С.А.** Вопросы механики процесса сварки металлов трением [Текст] / С.А. Серегин.— Филиал ТГУ при КемГУ. — Кемерово, 1991.— 154 с.
3. **Крагельский, И.В.** Основы расчетов на трение и износ [Текст] / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов.— М.: Машиностроение, 1977.
4. **Cavaliere, P.** High temperature deformation of friction stir processed 7075 aluminium alloy [Текст] / P. Cavaliere, A. Squillace // Materials Characterization.— 2005. Vol. 55.— P. 136–142.
5. **Dickerson, T.** Heat Flow Into Friction Stir Welding Tools [Текст] / T. Dickerson // 4th Intern. Symp. on Friction Stir Welding.— Park City, Utah, USA.— 14–16 May. 2003.



МОДЕЛИРОВАНИЕ. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

УДК 621.74.01:669.14

В.М. Голод, И.Г. Орлова

АНАЛИЗ СТРУКТУРНОЙ МИКРОНЕОДНОРОДНОСТИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ ИХ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ

Проблемы, связанные с проявлением литьевых дефектов на этапе прокатки стального листа, требуют тщательного, с учетом важнейших металлургических и технологических параметров изучения природы структурной и химической неоднородности, формирующейся при кристаллизации. В связи с этим важно изучение физико-химических факторов, влияющих на основные характеристики процесса кристаллизации сплавов: содержания компонентов, их перераспределения в процессе формирования структуры и ее неоднородности по сечению слитка, связанной с дендритной ликвацией. Объектом исследования являются низкоуглеродистые стали, которые в силу совокупности их механических и эксплуатационных характеристик применяются в производстве магистральных труб.

Цель исследования — анализ влияния структурных (величина междуусных промежутков λ), технологических (коэффициент теплоотдачи α), металлургических (состав сплава, перегрев при заливке), физико-химических (параметры диаграммы состояния и др.) и геометрических (толщина и конфигурация заготовок) параметров, рациональное сочетание которых способно обеспечить требуемые свойства литой заготовки и качество получаемого из нее проката.

Для достижения поставленной цели с использованием современного инструментария компьютерного анализа [1] необходимо последовательно решить такие задачи:

разработать компьютерную модель затвердевания многокомпонентных сплавов, учитывающую физико-химические условия и неравновесный характер фазовых превращений;

исследовать влияние основных металлургических и технологических факторов на величину и неоднородность междуусных промежутков дендритов, используя компьютерное моделирование и результаты металлографического анализа литьих заготовок.

Моделирование тепловых процессов при затвердевании. Для моделирования последовательного затвердевания многокомпонентных сплавов с максимальным учетом особенностей неравновесной кристаллизации, условий наружного теплоотвода и конвективного теплообмена между перегретым расплавом и кристаллизующейся твердой фазой использовали уравнение Фурье [2], решение которого методом конечных разностей позволяет рассчитать изменение температуры многокомпонентных сплавов перитектического типа по толщине литой заготовки от температуры перегрева до конечной температуры в каждой точке расчетной сетки с учетом переменного темпа выделения теплоты кристаллизации образующихся δ - и γ -фазы. Границные условия третьего рода на поверхности заготовки (плоской или цилиндрической конфигурации) задавали с помощью наружного коэффициента теплоотдачи α , значение которого варьировали в зависимости от принятого режима стационарного ($\alpha = \text{const}$) или нестационарного ($\alpha = \text{var}$) теплообмена, характерного для затвердевания в изложнице (опытные образцы) или при непрерывном литье (промышленные условия).

В разработанной модели предусмотрена возможность учета интенсивной термогравитационной конвекции перегретого расплава при затвердевании, оцениваемой с помощью коэф-

фициента конвекции ε_k : $\lambda_L = \varepsilon_k \lambda_0$, где λ_0 — коэффициент теплопроводности при отсутствии конвекции. Для расчета изменения коэффициента теплопроводности жидкой фазы λ_L использовано критериальное уравнение $\varepsilon_k = 0,18 (\text{GrPr})^{0,25}$ [1], где $\text{Gr} = g\beta\Delta TL_k^3 / \nu^2$ — критерий Грасгофа; $\text{Pr} = \nu/a$ — критерий Прандтля; g — ускорение силы тяжести; β , ν , a — температурный коэффициент объемной усадки, кинематическая вязкость и температуропроводность расплава. Изменение характерного размера L_k области конвекции и перепада температур ΔT в ней, обусловленное распределением температур в перегретом расплаве, оценивали на основе теплового расчета.

Расчеты, производимые с учетом конвективного движения расплава при затвердевании, исключают возможность существенной погрешности при определении скорости охлаждения V_0 и распределения температур в осевой зоне, а также скорости перемещения границы ликвидуса V_L по сечению отливки, что позволяет получить необходимую точность прогноза структуры [3, 4].

На рис. 1 приведено изменение скорости перемещения фронта ликвидуса V_L , градиента температуры G_L и параметра дисперсности структуры G_L/V_L по сечению литых заготовок различной конфигурации и размеров — цилиндрической отливки диаметром 80 мм, залитой в изложницу, и плоского непрерывно-литого слюба толщиной 240 мм.

В соответствии с различной интенсивностью теплоотвода значения V_L и G_L существенно отличаются при сходном характере изменения G_L по сечению с уменьшением на 4–5 порядков

в направлении от поверхности к центру. Значение V_L снижается к центру плоской заготовки в результате уменьшения перегрева и увеличивается в цилиндрической (в связи с сокращением фронта кристаллизации). Важно отметить, что параметр G_L/V_L , который теоретически связывают с переходом характера структуры фронта кристаллизации от плоского к ячеистому и затем — к дендритному [5], существенно снижается к центру и в наружной зоне заготовок имеет наиболее высокое значение.

В таблице сопоставлены значения параметров V_L , G_L и G_L/V_L для заготовок, полученных в изложницах и при непрерывном литье, с критическим значением параметра дисперсности микроструктуры G_L/V_L , отвечающим условию устойчивости плоского фронта кристаллизации [5]:

$$\left(\frac{G_L}{V_L} \right)_{kp} = \sum \frac{p_{Lj} C_{0j} (1 - k_j)}{k_j D_{Lj}}, \quad (1)$$

где C_{0j} — начальная концентрация j -го компонента в сплаве; D_{Lj} — коэффициент диффузии j -го компонента в жидкой фазе.

Многократное различие в величине параметра G_L/V_L по сечению литых заготовок и значительное их снижение относительно критических значений (на два порядка) свидетельствуют о существенной неоднородности структуры в заготовках и преобладании ячеистого и/или дендритного характера фронта кристаллизации. При этом важно учитывать, что в литых заготовках, в отличие от условий зонной плавки, описываемых формулой (1) с независимо регулируемыми параметрами V_L и G_L , кристаллизация происхо-

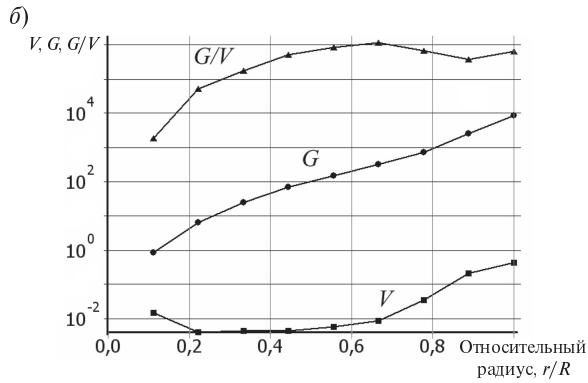
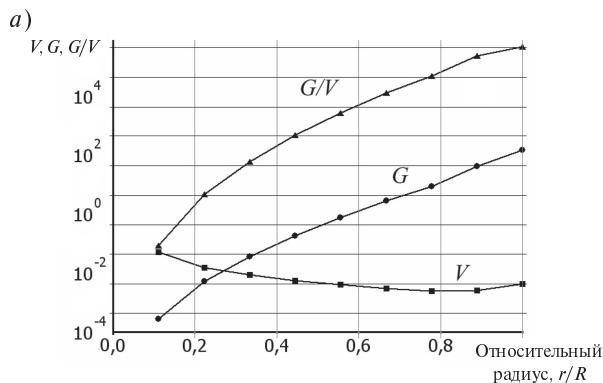


Рис. 1. Изменение скорости перемещения фронта ликвидуса V_L , градиента температуры G_L и параметра дисперсности структуры G_L/V_L по сечению заготовок (цилиндр диаметром 80 мм (а) и слаб толщиной 240 мм (б)); $r/R = 0$ — центр; $r/R = 1$ — поверхность



**Условия формирования структуры при кристаллизации отливок
в зависимости от конфигурации и условий теплоотвода (сталь 06ГНБ)**

Условия затвердевания отливок	Условие устойчивости плоского фронта	Теплофизические параметры					
		V_L , м/с		G_L , К/м		G_L/V_L , К·с/м	
		Центр	Поверхность	Центр	Поверхность	Центр	Поверхность
Цилиндр ($r = 0,08$ м, $\alpha = 10$ Вт/м ² ·К)	$G_L/V_L \cdot 7,2 \cdot 10^8$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^3$	$6,2 \cdot 10^{-1}$	$3,4 \cdot 10^6$
Сляб ($\delta = 0,24$ м, $\alpha = 800$ Вт/м ² ·К)	$G_L/V_L \cdot 7,2 \cdot 10^8$	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	2,72	$2,7 \cdot 10^3$	$5,8 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^6$

дит при прямой зависимости между ними, отражаемой граничным условием Стефана на фронте кристаллизации. В силу этих причин многочисленные попытки связать характеристики дендритной структуры при непрерывном литье с параметрами V_L и G_L корректны.

Моделирование неравновесной кристаллизации сплавов. Неравновесный характер кристаллизации многокомпонентных сплавов в результате подавления диффузии в твердой фазе, содержащей компоненты замещения с малыми значениями коэффициента диффузии D_{Sj}^j , темп выделения твердой фазы m при изменении температуры t описывается уравнением [6]

$$\frac{dm}{dt} = \sum \frac{1-m(1-\sigma_{ij}k_j)}{p_{Lj}C_{Lj}(1-k_j)}, \quad (2)$$

где p_{Lj} — тангенс угла наклона линии ликвидуса для j -го компонента сплава; k_j — коэффициент распределения j -го компонента между жидкой и твердой фазой; σ_j — коэффициент, учитывающий полноту протекания диффузии j -го компонента в твердой фазе, $\sigma_j = 2\alpha_j/(1+2\alpha_j)$, $\alpha_j = D_{Sj}/(\tau\lambda^2)$; τ и λ — локальная продолжительность выделения твердой фазы и ширина междусных промежутков дендритов в процессе их коалесценции [1]. Принятое соотношение исходит из условия локального равновесия на границе раздела фаз, равномерного распределения компонентов в остаточной жидкой фазе и аддитивного влияния компонентов сплава на ход процесса выделения твердой фазы [7]. При уменьшении σ_j от 1 до 0 характер перераспределения j -го компонента между фазами изменяется от равновесного ($D_{Sj} = \infty$) до предельно неравновесного ($D_{Sj} = 0$). Необходимое значение концент-

рации компонентов сплава в жидкой фазе C_{Lj} в условиях частичного прохождения диффузии в твердой фазе рассчитывали по уравнению [6]

$$dC_{Lj} = \frac{C_{Lj}(1-k_j)dm}{1-m(1-\sigma_jk_j)}. \quad (3)$$

Для моделирования кинетики процесса коалесценции вторичных ветвей дендритов при их формировании использовали соотношение [6]

$$\frac{d\lambda}{d\tau} = \frac{\Gamma}{3\lambda^2\varphi} \sum_K \frac{D_{Lj}}{p_j(1-k_j)C_{Lj}}, \quad (4)$$

где D_{Lj} — коэффициент диффузии в жидкой фазе; Γ — коэффициент Гиббса — Томсона; φ — морфологический параметр, соответствующий принятой модели коалесценции.

Моделирование процесса затвердевания на основе решения системы уравнений теплообмена совместно с уравнениями (2)–(4) позволяет рассмотреть комплекс вопросов о взаимосвязи параметров процесса затвердевания с условиями формирования дендритной структуры и перераспределения компонентов между фазами, которые являются предметом интенсивных исследований и дискуссий [8] в связи с тем значением, которое они имеют для управления структурно-химической микронеоднородностью литого металла.

В интересах обеспечения необходимой адекватности разработанных численных моделей соответствующие значения физико-химических (p_j , k_j , D_{Sj} , D_L и др.) и теплофизических (теплоемкость фаз в жидком и твердом состоянии c_{Si} , c_{Li} , L_i и др.) параметров моделируемых многокомпонентных систем на основе железа определяли, применения аппарат вычислительной термодинамики для расчета температурно-зависимых

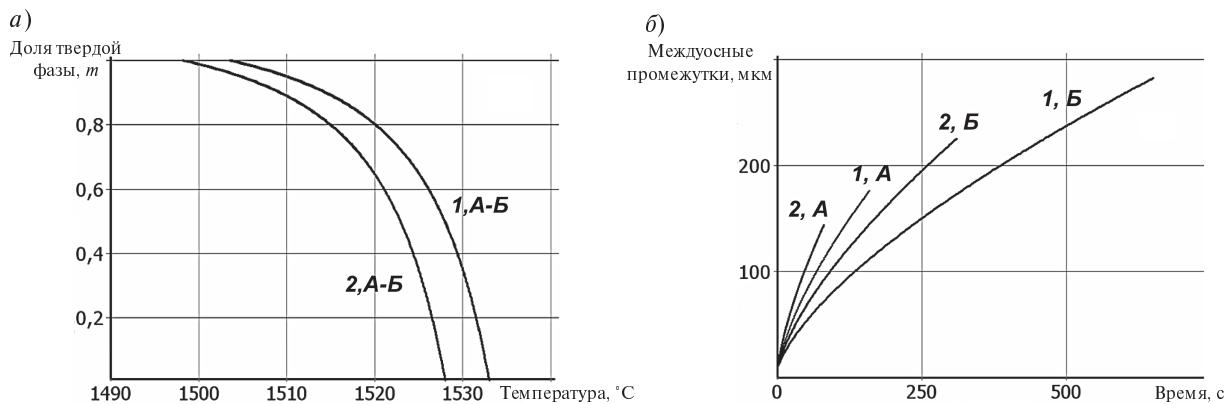


Рис. 2. Изменение количества твердой фазы (а) и междуусонных промежутков λ (б) при кристаллизации сплава Fe — 0,06 % C (1) с добавлением 1 % Mn (2) с интенсивностью теплоотвода 10 (кривые А) и 100 (Б) б, Вт/м²·К

значений соответствующих величин, а также используя обобщенные значения литературных данных [1, 6].

Численный анализ кристаллизации сплавов. Исследование влияния компонентов стали на характер затвердевания и структуру сплавов показывает, что вследствие весьма высокого значения коэффициента диффузии углерода D_{SC} ($\sigma_C \approx 0,99$) и его определяющего влияния на процесс выделения твердой фазы ход кристаллизации $m(t)$ при скоростях охлаждения $V_0 = 0,03\text{--}1$ К/с практически соответствует равновесному и мало изменяется при введении в сплав до 1 % Mn, Ni и Cr (рис. 2, а), в то время как их накопление в жид-

кой фазе носит существенно неравновесный характер ($\sigma_{Mn} \approx 0,54$; $\sigma_N \approx 0,45$; $\sigma_{Cr} \approx 0,46$ и др.) и сопровождается развитием дендритной ликвации.

Формирование дендритной структуры, являющейся наиболее важным проявлением неравновесного характера первичной кристаллизации, исследовали при варьировании содержания углерода и основных легирующих компонентов (Mn, Ni и Cr) с оценкой кинетики изменения λ (рис. 2, б и 3) в сопоставлении с результатами металлографического анализа (рис. 5).

Для оценки конечной дендритной структуры, как следует из соотношения (4), важен учет не только кинетики развития коалесценции, но

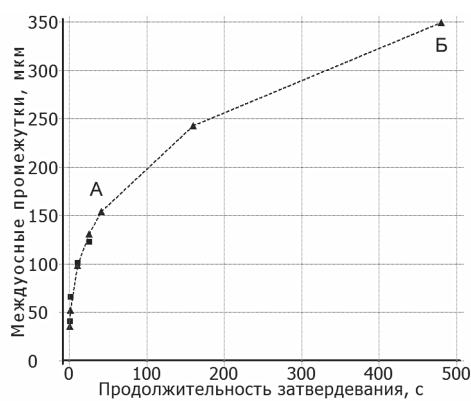


Рис. 3. Зависимость междуусонных промежутков дендритов от локальной продолжительности затвердевания точки — экспериментальные данные, пунктир — результаты расчета: А — осевая зона сляба толщиной 50 мм; Б — то же для сляба толщиной 240 мм

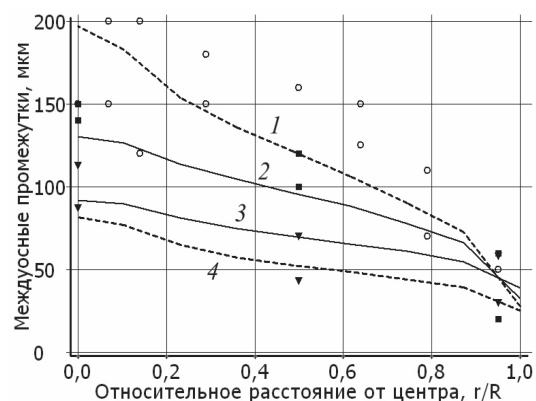


Рис. 4. Изменение междуусонных промежутков дендритов по сечению литых заготовок из стали 10ХГН2 линии — данные моделирования, точки — эксперимент для цилиндрических отливок диаметром 170 (2, ■) и 80 (3, ▼) мм, а также слябов толщиной 240 (1, ○) и 50 (4) мм

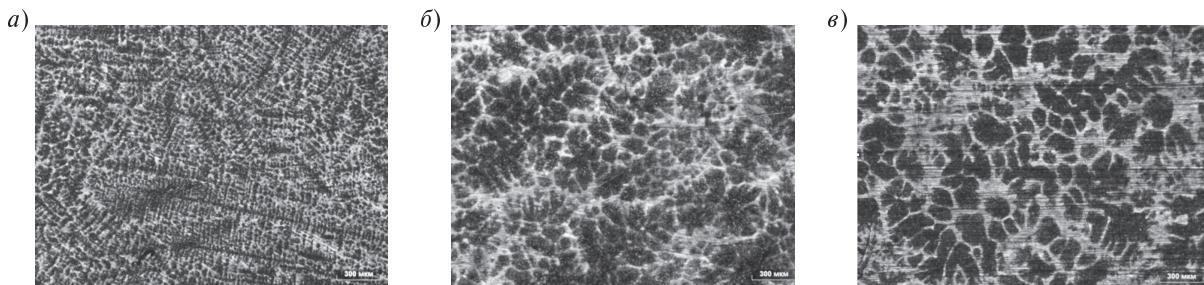


Рис. 5. Дендритная структура по сечению литого образца диаметром 80 мм
(*a* — поверхность; *б* — половина радиуса; *в* — центр)

также ее полной длительности, определяемой теплофизическими параметрами (температурный интервал неравновесной кристаллизации сплава и его скрытая теплота).

Введение марганца в сплав с 0,06 % С (рис. 2, б) ускоряет процесс коалесценции в связи с более интенсивным переносом примесей в расплаве, однако вызывает сокращение времени затвердевания и в результате приводит к сокращению междуосных промежутков.

Для экспериментальных заготовок различного размера, а также промышленных слябов с помощью численного моделирования была определена продолжительность кристаллизации τ_3 в различных участках по сечению, которая на рис. 3 сопоставлена с величиной расчетных и эмпирических междуосных промежутков дендритов.

Для непрерывно-литых заготовок значения λ определяли с помощью эмпирического уравнения, полученного на основе обобщения данных по их структуре, с учетом условий затвердевания и содержания углерода и других компонентов [9]:

$$\begin{aligned} \lambda = & (70C + 50Si - 0,178Mn + \\ & + 0,775Ni - 3,42Cr)\tau_3^{0,33}. \end{aligned}$$

На рис. 4 сопоставлены распределения междуосных промежутков дендритов по сечению литых заготовок на основе расчетов по разработан-

ной модели и согласно экспериментальным данным, которые получены методом металлографического анализа для опытных слитков и непрерывно-литых слябов [10]. Эти данные отмечают значительную дендритную неоднородность в макромасштабе, которая резко возрастает с увеличением толщины отливки в результате соответствующего повышения локальной продолжительности затвердевания.

Важным показателем дендритной неоднородности литых образцов, кроме перепада средних значений λ_{cp} по их сечению (см. рис. 4), служит значительный размах σ_λ локальных значений междуосных промежутков, который по данным металлографического анализа (рис. 5) составляет $\sigma_\lambda = \pm 13-15 \text{ мкм}$ при весьма значительном коэффициенте вариации ($V_\lambda = 15-30\%$). Эти характеристики, которые нередко игнорируют, прямо свидетельствуют о необходимости более полной характеристики дендритной неоднородности с учетом совместной реализации различных механизмов коалесценции, учитываемых формулой (4).

Совокупность приведенных данных свидетельствует об адекватности разработанной модели (2)–(4) и возможности ее использования для оценки структурной микронеоднородности в литых образцах и промышленных заготовках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Голод, В.М. Моделирование и компьютерный анализ кристаллизации многокомпонентных сплавов на основе железа [Текст] / В.М. Голод, К.Д. Савельев, А.С. Басин.— СПб, Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— 372 с.
- Голод, В.М. Эволюционная модель кристаллизации стали [Текст] / В.М. Голод.— СПб., Изд-во Политехн. ун-та.— Труды СПбГТУ, Материалы и химические технологии.— 2009, № 510.— С. 242–257.
- Орлова, И.Г. Исследование теплофизических условий формирования структуры при кристаллизации сплавов Fe—C—Mn [Текст] / И.Г. Орлова, В.М. Голод.— Матер. межд. науч.-практ. конф.— СПбГПУ.— СПб., 2010.— С. 20–21.
- Орлова, И.Г. Влияние конвективного теплообмена на теплофизические условия формирования структуры при кристаллизации сплавов Fe—C [Текст] / И.Г. Орлова, В.М. Голод.— Матер. XVIII

межд. науч.-метод. конф., т. I.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.— С. 157–160.

5. **Флемингс, М.** Процессы затвердевания [Текст] / М. Флемингс.— М.: Мир, 1977.— 424 с.

6. **Голод, В.М.** Вычислительная термодинамика в материаловедении [Текст] / В.М. Голод, К.Д. Савельев.— СПб., Изд-во Политехн. ун-та, 2010.— 218 с.

7. **Hun, Q.** Model for the isothermal coarsening of secondary dendrite arms in multicomponent alloys [Текст] / Q. Hun [et al.] // Metall. Mater. Trans. — 2001. Vol. 28B, № 12.— P. 1185–87.

8. **Boettinger, W.J.** Solidification microstructures: recent developments, future directions [Текст] / W.J. Boettinger [et al.] // Acta Mater.— 2000. Vol. 48, № 1.

9. **Cabrera-Marero, J.M.** Macro-micro modeling of the dendritic microstructure of steel billets processed by continuous casting [Текст] / J.M. Cabrera-Marero [et al.] // ISIJ Int.— 1998.— Vol. 38, № 8. P. 812–821.

10. **Louhenkilpi, S.** Simulation of microstructure of as-cast steels in continuous casting [Текст] / S. Louhenkilpi [et al.] // ISIJ Int., 2006.— Vol. 46, № 6.— P. 914–920.

УДК 629.1.032.001

P.B. Русинов, Р.Ю. Добрецов

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО ЦИКЛА ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Для оценки теоретически возможных показателей поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) по мощности и экономичности уже давно существуют методы расчета так называемых идеальных тепловых циклов, в которых рассматривается только сам принцип термодинамического преобразования потенциальной энергии топлива в механическую работу, но не учитываются реальные потери энергии — механические, тепловые и газодинамические¹.

Есть расчетные методы и для рабочих, или действительных, циклов в виде функциональной зависимости давления газов в цилиндрах ДВС от хода их поршней (объема цилиндров), но они сложны в использовании и содержат большое количество произвольно выбираемых коэффициентов, в связи с чем дают лишь приближенное представление об истинных эксплуатационных показателях конкретных ДВС.

Таким образом, при проектировании новых или модернизации существующих двигателей фактически отсутствуют достаточно надежные расчетные ориентиры, и изначально при выборе параметров тепловых циклов ДВС обычно вы-

нуждены ориентироваться только на уже достигнутые в эксплуатации результаты.

Тем не менее использование упомянутых расчетных методов, даже и не очень совершенных, является обязательным при определении действующих механических нагрузок и решении проблем прочности двигателей.

В связи со сказанным представляется, что для расчетного поиска прогрессивных показателей тепловых циклов с целью создания наиболее перспективных конструкций двигателей необходима разработка по возможности простой расчетной математической модели теплового процесса ДВС (индикаторная диаграмма), гарантирующей достаточно объективную оценку влияющих на эксплуатационные показатели двигателей факторов и возможность поиска оптимальных соотношений последних.

Практически это можно осуществить на базе исходно принимаемых в достаточной степени реальных «внешних» эксплуатационных показателей теплового цикла, таких, как степень сжатия, максимальное давление сгорания топлива, механический и эффективный КПД и т. д.

В основу формирования подобной математической модели прежде всего закладывается оценка доли тепловой энергии, вносимой в цикл и используемой для производства только механической энергии.

1 Русинов Р.В., Добрецов Р.Ю. Двигатели автомобилей и тракторов.— СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009.— С. 29, 120.



Эта доля, $Q_1 = Q'_1 + Q''_1$ (рис. 1), зависит от эффективного КПД η_e двигателя, механических потерь, оцениваемых по η_m — механическому КПД, и тепловых потерь $Q_{\text{пот}}$, имеющих место в политропических процессах сжатия и расширения рабочего тела в цилиндрах ДВС с учетом теплопотерь рассеяния во внешнюю среду и неполноты сгорания топлива.

Итак, $Q_1 = [\eta_e + (1 - \eta_m) - Q_{\text{пот}}]Q_0$, где Q_0 — общее количество вносимой в цикл с топливом тепловой энергии, приходящейся на единицу массы рабочего тела (смесь топлива с воздухом).

Очевидно, что Q_0 зависит от низшей теплотворной способности топлива Q_T^H , теоретического количества воздуха L_0 , необходимого для сгорания единицы массы топлива, коэффициента избытка воздуха α , принятого для обеспечения наиболее полного сгорания топлива: $Q_0 = Q_T^H / (1 + \alpha L_0)$ с учетом единицы массы топлива.

Примем для конкретности дальнейших расчетов исходные данные восьмицилиндрового V-образного дизеля транспортного назначения ЯМЗ-238 с эффективной мощностью $N_e = 176,5 \text{ кВт}$ (240 л.с.) и числом оборотов коленчатого вала $n = 2100 \text{ мин}^{-1}$. У него коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,5$; степень сжатия $\varepsilon = 16,5$, максимальное давление сгорания топлива $p_z = 8,5 \text{ МПа}$; механический КПД $\eta_m = 0,850$, среднее эффективное давление цикла $p_e = 0,678 \text{ МПа}$, эффективный КПД $\eta_e = 0,360$ и расход топлива $g_e = 0,236 \text{ кг/кВт·ч}$.

При низшей теплотворной способности дизельного топлива $Q_T^H = 10000 \text{ ккал/кг}$ (42000 кДж/кг) и массе воздуха, теоретически необходимой для сгорания единицы массы дизельного топлива, $L_0 = 14,3 \text{ кг/кг}$ получим общее теплосодержание рабочей смеси для дизеля ЯМЗ-238 с учетом единицы массы топлива:

$$\begin{aligned} Q_0 &= Q_T^H / (1 + \alpha L_0) = \\ &= 10000 / (1 + 1,5 \cdot 14,3) = 445,4 \text{ ккал/кг.} \end{aligned}$$

Принимая ориентировочно $Q_{\text{пот}} = 8 \%$, имеем $Q_1 = Q'_1 + Q''_1 = [0,360 + (1 - 0,85) - 0,08]445,4 = 192 \text{ ккал/кг.}$

При этих условиях параметрические показатели математической модели цикла в узловых точках a , c , y , z , b (рис. 1) рассчитываются элементарно [1].

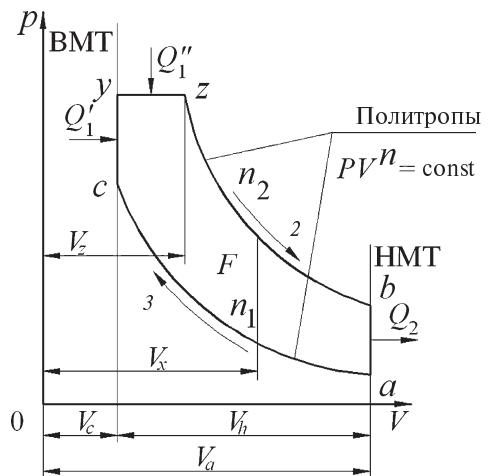


Рис. 1. Расчетный тепловой цикл быстродействующего дизеля: p — давление в цилиндре; V — объем цилиндра; V_a — полный объем цилиндра; V_c — объем камеры сгорания; V_h — рабочий объем; V_z — объем в конце предварительного расширения; V_x — текущий объем; $Q'_1 + Q''_1 = Q_1$ — теплота, подводимая к рабочему телу; Q_2 — отводимая теплота; n_1 и n_2 — показатели политроп сжатия и расширения; F — площадь индикаторной диаграммы; ВМТ — верхняя мертвая точка положения поршня; НМТ — нижняя мертвая точка

Так, при начальных давлении $p_a = 0,083 \text{ МПа}$ ($0,85 \text{ кгс/см}^2$) и температуре $T_a \approx 290 \text{ K}$ в цилиндрах дизеля ЯМЗ-238, реальных показателях политроп процессов сжатия $n_1 = 1,37$ и расширения $n_2 = 1,22$, теплоемкостях горючей смеси (рабочего тела) при постоянном объеме $c_v = 0,17 \text{ ккал/кг·град}$ и постоянном давлении $c_p = 0,23 \text{ ккал/кг·град}$ проводим следующий расчет давления и температуры в конце процесса сжатия:

$$p_c = p_a \varepsilon^{n_1} = 0,083 \cdot 16,5^{1,37} = 3,86 \text{ МПа};$$

$$T_c = T_a \varepsilon^{n_1-1} = 290 \cdot 16,5^{1,37-1} = 818,2 \text{ K};$$

степень повышения давления

$$\lambda = p_z / p_c = 8,5 / 3,86 = 2,2;$$

температура

$$T_y = \lambda T_c = 2,2 \cdot 818,2 = 1799,9 \text{ K};$$

$$Q'_1 = c_v (T_y - T_c) =$$

$$= 0,17 (1799,9 - 818,2) = 166,9 \text{ ккал/кг};$$

$$Q''_l = Q_l - Q'_l = 192 - 166,9 = 25,1 \text{ ккал/кг};$$

максимальная температура процесса сгорания

$$T_z = Q''_l / c_p + T_y =$$

$$= 25,1/0,23 + 1799,9 = 1909,1 \text{ К};$$

степень предварительного расширения рабочего тела

$$\rho = V_z / V_a = T_z / T_y = 1909,1 / 1799,9 = 1,061;$$

степень последующего расширения

$$\delta = V_b / V_z = V_a / V_z = \varepsilon / \rho = 16,5 / 1,061 = 15,6;$$

давление и температура в конце процесса расширения соответственно равны

$$p_b = p_z / \delta^{n_2} = 8,5 / 15,6^{1,22} = 0,30 \text{ МПа}$$

и

$$T_b = T_z / \delta^{n_2-1} 1909,1 / 15,6^{1,22-1} = 1043,8 \text{ К}.$$

По расчетным данным строится упомянутая выше математическая модель теплового процесса (рис. 1).

Далее, поскольку в подводимой к рабочему телу теплоте Q_l учтены потери и на преодоление механических потерь (член $(1 - \eta_m)$), то площадь F индикаторной диаграммы, характеризующая энергетическую способность цикла, в определенном масштабе представляет индикаторную мощность N_i двигателя.

При этом среднее индикаторное давление p_i единичного цикла устанавливается делением площади F на рабочий объем V_h цилиндра (на ход S поршня при расчете площади индикаторной диаграммы в координатах « $P - S$ »).

Сама площадь F на рисунке представляется площадью $F_1 + F_2$ под линиями « $y - z$ » и « $z - b$ » (участки 1 и 2) за вычетом площади F_3 под кривой « $c - a$ » (участок 3). Выражаем эти площади так:

$$F_1 = p_z (V_z - V_c) = p_z \frac{V_c}{V_c} (V_z - V_c) = \lambda p_c V_c (\rho - 1).$$

Для участка 2 согласно уравнению политропы

$$p_z V_z^{n_2} = p_x V_x^{n_2}$$

и

$$p_x = p_z (V_z / V_x)^{n_2} = \lambda p_c V_z^{n_2} V_x^{-n_2},$$

а дифференциал равен

$$dF_2 = \lambda p_c V_z^{n_2} V_x^{-n_2} dV_x,$$

откуда

$$F_2 = \lambda p_c V_z^{n_2} \int_{V_z}^{V_b=V_a} V_x^{-n_2} dV_x =$$

$$= \lambda p_c V_z^{n_2} \frac{V_x^{-n_2+1}}{-n_2+1} \Big|_{V_z}^{V_a} = \frac{\lambda p_c V_z}{-n_2+1} \left(\frac{V_z^{n_2-1}}{V_a^{n_2-1}} - \frac{V_z^{n_2-1}}{V_b^{n_2-1}} \right) = \\ = \frac{\lambda p_c V_z}{n_2-1} \left(1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}} \right).$$

По аналогии с предыдущим

$$F_3 = \frac{p_c V_c}{n_1-1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1-1}} \right).$$

Индикаторное давление

$$p_i = \frac{p_c}{V_a - V_c} \frac{V_c}{V_c} \times$$

$$\times \left[\lambda V_c (\rho - 1) + \frac{\lambda V_z}{n_2-1} \left(1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}} \right) - \frac{V_c}{n_2-1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1-1}} \right) \right],$$

или

$$p_i = \frac{p_c}{\varepsilon - 1} \times$$

$$\times \left[\lambda (\rho - 1) + \frac{\lambda \rho}{n_2-1} \left(1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}} \right) - \frac{1}{n_1-1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1-1}} \right) \right].$$

Для принятых расчетных условий

$$p_i^p = \frac{3,86}{16,5-1} \times \\ \times \left[2,2(1,058-1) + \frac{2,2 \cdot 1,058}{1,22-1} \left(1 - \frac{1}{15,60^{1,22-1}} \right) - \right. \\ \left. - \frac{1}{1,37-1} \left(1 - \frac{1}{16,5^{1,37-1}} \right) \right] = 0,797 \text{ МПа}.$$

В первом приближении (тепловые потери в политропических процессах сжатия и расширения учтены ранее) представляется возможным оценить «индикаторный» КПД η_i^0 для участка « $z - b$ » цикла (рис. 1) соотношением

$$\eta_i^0 = (T_z - T_b) / T_z = (1909,1 - 1043,8) / 1909,1 = 0,453.$$

При этом ход поршня соответствует только основной его части, т. е. величине $\delta = V_a / V_z$, и для приведения индикаторного КПД к полному ходу



η_i^0 следует умножить на отношение $\delta/\varepsilon = 1/\rho$:
 $\eta_i^p = \eta_i^0 / \rho = 0,453 / 1,061 = 0,427$.

В анализе эксплуатационных показателей ДВС, естественно, необходимо учитывать и механический КПД η_m , кстати говоря, существенно зависящий от нагрузки двигателя, в частности для холостого хода двигателей он просто равен нулю, а при полной нагрузке ДВС максимальен.

С учетом примерного равенства механических потерь на различных режимах работы двигателей из очевидного выражения

$$\eta_m = N_e / N_i = N_e / (N_e + N_{m\pi})$$

следует, что механические потери равны

$$N_{m\pi} = N_e \frac{1 - \eta_m}{\eta_m}.$$

Таким образом, для любой нагрузки

$$\eta_m^p = N_e^p / \left(N_e^p + N_e \frac{1 - \eta_m}{\eta_m} \right),$$

где N_e и η_m – фактические данные «базового» варианта конкретного двигателя.

При этом, 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 только p_i^p и p_i , то после преобразований окончательно имеем $\eta_m^p = 1 - (1 - \eta_m) p_i / p_i^p$.

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 $\eta_m^p = 1 - (1 - 0,850) 0,798 / \eta_i^p = 1 - 0,12 / p_i^p$.

Сообразно исходному выражению для дизеля ЯМЗ-238 функциональная зависимость для η_m^p от мощности следующая:

$$\begin{aligned} \eta_m^p &= N_e^p / \left(N_e^p + 176,5 \frac{1 - 0,850}{0,850} \right) = \\ &= N_e^p / (N_e^p + 31,15). \end{aligned}$$

Графически она изображена на рис. 2. Как видим, она характерна по конфигурации для подобного вида кривых и реальна по численным значениям.

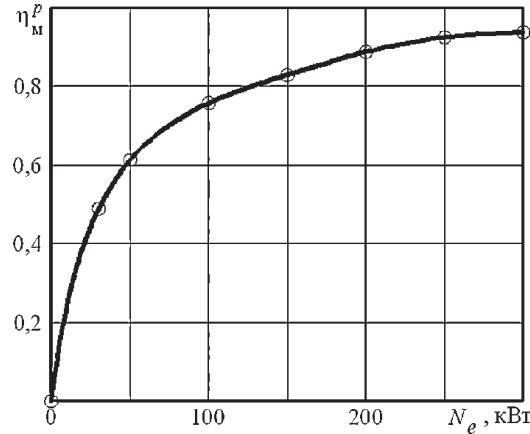


Рис. 2. Функциональная зависимость механического КПД η_m^p от эффективной мощности N_e для дизеля ЯМЗ-238

Для рассчитываемого варианта (поз. 3 табл. 1)

$$\eta_m^p = 1 - 0,12 / 0,797 = 0,849$$

и

$$p_e^p = \eta_m^p p_i^p = 0,849 \cdot 0,797 = 0,677.$$

Этому соответствуют расчетные эффективный КПД

$$\eta_e^p = \eta_m^p \eta_i^p = 0,849 \cdot 0,427 = 0,363$$

и удельный расход топлива

$$\begin{aligned} Q'_1 &= c_v (T_y - T_c) = \\ &= 3600 / (42000 \cdot 0,363) = 0,236 \text{ кг/кВт}\cdot\text{ч}. \end{aligned}$$

Эффективная мощность $N_e^p = N_e p_e^p / p_e = 176,5 \cdot 0,677 / 0,678 = 176,2$ кВт.

Как видим, все основные расчетные величины для принятой математической модели, такие как p_e^p , η_e^p , g_e^p и N_e^p , фактически тождественны исходным показателям дизеля ЯМЗ-238, и, следовательно, предлагаемая математическая модель теплового цикла работоспособна.

В качестве примеров ее использования рассмотрим соотношения основных эксплуатационных показателей дизеля ЯМЗ-238 при изменении степени сжатия, максимального давления сгорания и теплотворной способности горючей смеси.

По итогам расчетов, аналогичных проведенным выше и представленных в табл. 1, 2 и 3, прежде надлежит отметить практическую важность учета механического КПД (табл. 2), вно-

Таблица 1

Показатели дизеля ЯМЗ-238 в зависимости от степени сжатия ϵ

№ п/п	ϵ	p_e , МПа	λ	T_c , К	T_y , К	Q'_e , ккал/кг	T_z , К	T_b , К	ρ	δ	P_i^p , МПа	η_i^p	P_e^p , МПа	η_e^p	g_e^p , кГ/кВт·ч	N_e^p , кВт
1	15,5	3,55	2,39	799,5	1916,1	189,8	1925,6	1054,8	1,005	15,4	0,793	0,450	0,849	0,673	0,382	224
2	16,0	3,70	2,30	809,0	1856,2	178,0	1916,9	1049,0	1,033	15,5	0,795	0,438	0,849	0,675	0,372	230
3	16,5	3,86	2,20	818,2	1799,9	166,9	1909,1	1043,8	1,061	15,6	0,797	0,427	0,849	0,677	0,363	236
4	17,0	4,03	2,11	827,3	1747,0	156,3	1902,0	1039,0	1,089	15,6	0,798	0,417	0,850	0,678	0,354	242
5	17,5	4,19	2,03	836,2	1697,1	146,3	1895,6	1034,8	1,117	15,7	0,800	0,407	0,850	0,680	0,346	248

$Q_1 = 192$ ккал/кг; $\alpha = 1,5$; $p_z = 8,5$ МПа; $p_a = 0,835$ МПа; $T_a = 190$ К; $n_1 = 1,37$; $n_2 = 1,22$; $c_v = 0,17$ ккал/кГ·град; $c_p = 0,23$ ккал/кГ·град;

Таблица 2

Показатели дизеля ЯМЗ-238 в зависимости от максимального давления сгорания p_z

№ п/п	p_z , МПа	λ_c	T_y , К	Q'_e , ккал/кг	Q''_e , ккал/кг	T_z , К	ρ	δ	T_b , К	P_i^p , МПа	η_i^p	P_e^p , МПа	η_e^p	g_e^p , кГ/кВт·ч	N_e^p , кВт
1	7,0	1,81	1482,3	112,9	79,1	1826,2	1,232	13,39	1031,9	0,770	0,353	0,844	0,650	0,298	288
2	7,5	1,94	1588,2	130,9	61,1	1853,9	1,167	14,14	1035,2	0,780	0,378	0,846	0,660	0,320	268
3	8,0	2,07	1694,0	148,9	43,1	1881,5	1,111	14,86	1039,1	0,789	0,403	0,848	0,669	0,342	251
4	8,5	2,20	1799,9	166,9	25,1	1909,1	1,061	15,56	1043,8	0,797	0,427	0,849	0,677	0,363	236
5	9,0	2,33	1905,8	184,9	7,1	1936,7	1,016	16,24	1049,0	0,804	0,451	0,851	0,684	0,384	223

$\varepsilon = 16,5$; $\alpha = 1,5$; $Q_1 = 192$ ккал/кг; $p_a = 3,86$; $T_c = 818$

Таблица 3

Показатели дизеля ЯМЗ-238 в зависимости от коэффициента избытка воздуха при горении топлива σ

№ п/п	α	Q_0 , ккал/кг	Q_e , ккал/кг	Q''_e , ккал/кг	T_z , К	ρ	δ	T_b , К	P_i^p , МПа	η_i^p	P_e^p , МПа	η_e^p	g_e^p , кГ/кВт·ч	N_e^p , кВт
1	1,3	510,5	219,3	52,4	2026,9	1,127	14,64	1123,1	0,887	0,396	0,865	0,767	0,343	250
2	1,4	475,7	204,6	37,7	1963,0	1,091	15,12	1080,0	0,837	0,415	0,857	0,717	0,356	241
3	1,5	445,4	192,0	25,1	1909,1	1,061	15,6	1943,8	0,797	0,427	0,849	0,677	0,363	236
4	1,6	418,8	180,7	13,2	1856,5	1,032	15,99	1008,8	0,756	0,437	0,841	0,636	0,368	233
5	1,7	395,1	170,0	3,1	1812,6	1,008	16,37	980,0	0,723	0,456	0,834	0,603	0,380	226

$p_z = 8,5$ МПа; $\varepsilon = 16,5$; $\lambda = 2,2$; $T_a = 290$ К; $p_a = 0,083$ МПа; $p_e = 3,86$ МПа; $T_e = 818,2$ К; $T_c = 818$ К; $Q_1 = 1799,1$ К; $Q' = 1799,2$ К; $Q'' = 166,9$ ккал/кг



сящего существенные корректизы в выходные рабочие показатели двигателей, прежде всего по мощности и экономичности.

Далее по результатам расчета особо следует отметить несправедливость общепринятого безговорочного утверждения о целесообразности во всех случаях повышать степень сжатия с целью повышения экономичности ДВС.

В частности, как видно по табл. 1, при фиксированном максимальном давлении сгорания p_z по мере увеличения степени сжатия и среднее индикаторное p_i^p , и среднее эффективное p_e^p давления практически остаются неизменными, а КПД η_i^p и η_e^p при этом даже уменьшаются, соответственно возрастает удельный расход топлива g_e^p .

Данное обстоятельство соответствует фактической неизменности площади F индикаторной диаграммы, убывающей по мере роста степени сжатия и роста давления p_c в конце процесса сжатия, но компенсируемой за счет роста степени предварительного расширения $\rho = V_z / V_y$ (см. рис. 1).

По причине последнего обстоятельства, влекущего за собой уменьшение степени последующего или истинного расширения δ , в меньшей степени используется теплосодержание самого рабочего тела, в связи с чем возрастают непроизводительные потери энергии, а эффективность цикла падает.

По табл. 1 очевидно, что серийный вариант двигателя ЯМЗ-238 с $\varepsilon = 16,5$ (поз. 3) при практически неизменной мощности менее экономичен по сравнению с вариантом $\varepsilon = 15,5$ (расход топлива, соответственно равны 236 и 224 г/кВт·ч).

Однако в данном случае реально выбранная степень сжатия предпочтительна по соображениям более надежного запуска двигателя, как обеспечивающая более высокую температуру рабочего тела в конце процесса сжатия (непосредственно перед впрыском топлива), что весьма важно именно для дизелей транспортного назначения.

По данным табл. 2 очевидна положительная в принципе роль роста максимального давления p_z сгорания топлива, при росте которого индикаторные показатели p_i^p и η_i^p , равно как и эффективные p_e^p и η_e^p , только улучшаются.

Характерны расчетные данные табл. 3, отмечающие особенности влияния теплотворной способности рабочей смеси, в данном случае связанные с коэффициентом избытка α воздуха.

Строго говоря, в рассмотренном диапазоне α (1,3–1,4) для дизелей типа ЯМЗ-238 с неразделенными камерами сгорания полное сгорание топлива не обеспечивается, однако это обстоятельство, рассматриваемое в чисто расчетном плане, т. е. при прочих «равных» условиях, не мешает осуществлять сравнительную оценку.

В то же время при $\alpha > 1,7$ уже не достигается принятное предельное максимальное давление сгорания $p_z = 8,5$ МПа из-за ограниченности для данной комбинации действующих факторов тепловой энергии рабочей смеси — Q_l^H (поз. 5 табл. 3).

Табл. 3 четко отмечает тенденцию падения мощности двигателя с увеличением α , но и слишком раз подтверждает справедливость вывода о падении эффективности теплового цикла с увеличением ρ .

В общем итоге: предлагаемый, оригинальный по сути, экспресс-метод расчета основных параметров теплового процесса двигателей, помимо простоты и удобства в использовании, позволяет осуществлять сравнительный анализ возможных цикловых комбинаций и обеспечивает поиск оптимальных соотношений, влияющих на качество теплового процесса ДВС.

Предлагаемый метод, естественно, не менее пригоден и для прочностных расчетов, включаяющих расчет не только газовых нагрузок, но и сил инерции вращающихся и поступательно движущихся масс кривошипно-шатунного механизма ДВС.

При использовании предлагаемого метода возможны некоторые затруднения с оценкой непроизводительных тепловых потерь.

В определенной степени они могут быть уточнены путем математической оценки или приняты на базе статистических данных.

В «худшем» случае по предлагаемому методу возможны простые расчеты целого ряда вариантов тепловых циклов с дальнейшим выбором из них числа наиболее реального варианта.

УДК 539.3:624.073

С.О. Барышников

УПРУГАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ. КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ

Теория упругой устойчивости, начало которой было положено еще в работах Л. Эйлера, — весьма широко разработанный раздел механики, располагающий рядом эффективных методов, большим количеством решенных задач и обширной литературой.

Устойчивость в широком смысле определяется как свойство системы мало отклоняться от невозмущенного движения (равновесия) при действии малых возмущений. Когда говорят об устойчивости, то имеют ввиду: вид движения (равновесия), устойчивость которого рассматривается; параметры, определяющие состояние системы; виды возмущений; интервал времени, на котором система должна быть устойчивой. На практике термин устойчивость обычно трактуют как свойство системы сохранять заданную форму равновесия при заданных условиях нагружения.

Разработкой критериев устойчивости занимались Л. Эйлер, Ж.Л. Лагранж, Ж.А. Пуанкаре, А.М. Ляпунов и другие выдающиеся ученые. В строительной механике в основном используются три критерия устойчивости: динамический, статический и энергетический.

Статический критерий устойчивости — исторически первый. В теории упругой устойчивости предполагается, что при достаточно малых нагрузках равновесие упругой системы устойчиво и остается таковым вплоть до первой точки разветвления форм равновесия, за которой исходная форма становится неустойчивой. Критическая сила (или в общем случае параметр группы сил) определяется при этом как наименьшее значение силы, при котором наряду с исходной формой равновесия имеют место смежные, весьма близкие к ней другие формы равновесия. Такой подход (его часто называют методом Эйлера, или методом нейтрального равновесия) позволил свести вопрос об устойчивости формы равновесия к более простому — об отыскании минимальных собственных значений некоторых краевых задач.

Плодотворность метода Эйлера в теории упругой устойчивости бесспорна, и в настоящее

время этот метод признан классическим. Вместе с тем метод Эйлера не универсален: он имеет вполне определенную область применения, выход за рамки которой неоднократно служил источником ошибок и недоразумений. Метод Эйлера применим, если внешние силы обладают потенциалом (то есть являются консервативными силами), но становится непригодным, если потенциал у внешних сил отсутствует.

Более общим и строгим является динамический критерий устойчивости. Согласно этому критерию критические нагрузки определяются с позиций устойчивости движения. Впервые, по-видимому, этот критерий для консервативных систем с конечным числом степеней свободы использовался Ж.Л. Лагранжем. Строгое математическое определение его для частного класса систем было дано А.М. Ляпуновым. Впоследствии динамический критерий был обобщен и расширен.

Использование динамического критерия сводится к интегрированию уравнений движения системы и исследованию поведения их решения во времени или же к исследованию характера возмущенного движения исходя из структуры самих дифференциальных уравнений. В случае нелинейных задач исследуются нелинейные колебания системы около ее равновесного положения. Динамический критерий применим к консервативным и неконсервативным системам.

Несмотря на свою общность и строгость, динамический критерий не нашел широкого применения в строительной механике. Большинство задач устойчивости было решено в рамках более простых критериев — статического и энергетического.

В основе энергетического критерия лежат два фундаментальных положения механики сплошных сред: принцип возможных перемещений и принцип возможных изменений напряженного состояния. Из принципа возможных перемещений непосредственно следует принцип стационарности полной потенциальной энергии $\delta P = 0$, который утверждает, что из всех переме-



щений, отвечающих граничным условиям, те, которые удовлетворяют уравнениям равновесия, придают полной потенциальной энергии системы Π стационарное значение. Из принципа возможных изменений напряженного состояния следует принцип стационарности дополнительной энергии, согласно которому из всех удовлетворяющих уравнениям равновесия и граничным условиям напряжений те, что соответствуют условиям совместности деформаций, придают дополнительной энергии стационарное значение.

Уравнение $\delta\Pi = 0$ выделяет равновесные состояния. Об устойчивости этих состояний в случае линейных задач можно судить с помощью теоремы Дирихле: если равновесное состояние устойчиво, то полная потенциальная энергия имеет минимум ($\delta\Pi = 0, \delta^2\Pi < 0$, где δ^2 — символ второй вариации), если неустойчиво — максимум ($\delta\Pi = 0, \delta^2\Pi > 0$), безразличному равновесию соответствует постоянная величина энергии ($\delta\Pi = 0, \delta^2\Pi = 0$). Исследование знака второй вариации на всевозможных перемещениях представляет собой трудную задачу. В линейных задачах устойчивости обычно используют условия $\delta\Pi = 0, \delta^2\Pi = 0$.

Если в безразличном равновесии энергию Π представить в виде

$$\Pi = \Pi_0 + \delta\Pi + \delta^2\Pi + \dots$$

(где Π_0 — энергия исходного состояния; $\delta\Pi, \delta^2\Pi$ — части энергии, содержащие соответственно первые и вторые степени дополнительных смещений), то в силу того, что исходное состояние — равновесное и не варьируется, из

условия $\delta\Pi = 0$ получим $\delta(\delta^2\Pi) = 0$. Последнее равенство является вариационной формулировкой статического критерия, так как из него непосредственно следуют уравнения Эйлера. В консервативных задачах условия $\delta^2\Pi = 0$ и $\delta(\delta^2\Pi) = 0$ эквивалентны, применение их обусловлено простотой получения конечного результата. В большинстве случаев более простым можно считать условие $\delta(\delta^2\Pi) = 0$.

Энергетический критерий является видоизменением статического, так как все его уравнения — это те же уравнения статического критерия, записанные в вариационной форме. В линейных

задачах устойчивости консервативных систем оба критерия приводят к одинаковым результатам.

Под линейной теорией здесь понимается исследование устойчивости равновесия упругого тела по отношению к малым возмущениям (то есть устойчивость «в малом»). Такое исследование, как известно, приводит к линейным дифференциальным уравнениям. Эти уравнения отличаются, однако, от уравнений классической линейной теории упругости наличием дополнительных членов, содержащих параметры, с точностью до которых задана внешняя нагрузка. Чтобы получить эти члены, приходится делать различие между геометрией начального (невозмущенного) состояния, устойчивость которого исследуется, и геометрией других, близких к нему состояний. В линейной теории упругости это различие, как известно, игнорируется. Чтобы получить уравнения, описывающие поведение малых возмущений для заданной формы равновесия, приходится исходить из уравнений нелинейной теории упругости.

К сказанному необходимо добавить следующее. Если в основу положить уравнения линейной теории, то в силу теоремы единственности Кирхгофа придет к выводу, что при заданных нагрузках и граничных условиях возможна лишь единственная форма равновесия. Между тем сама постановка задачи упругой устойчивости предполагает возможность существования форм равновесия (или движения) отличных от невозмущенной.

Нелинейность уравнений теории упругости может быть как геометрического, так и физического происхождения. Геометрическая нелинейность связана с необходимостью различать координаты начального и конечного состояний, а также с необходимостью пользоваться полными выражениями для компонентов тензора деформаций. Физическая нелинейность проистекает от нелинейной связи между компонентами напряженного и деформированного состояний, с которой в ряде случаев следует считаться.

Говоря об устойчивости некоторой формы равновесия, мы эту форму равновесия будем называть невозмущенной. Наряду с невозмущенной формой равновесия рассматривают некоторые достаточно близкие к ней возмущенные формы равновесия. Во многих случаях для суждения об устойчивости (неустойчивости) рав-

новесия можно предположить возмущения достаточно малыми и, исследуя характер этих возмущений, исходить из линеаризованных дифференциальных уравнений. Такие уравнения, следуя Ж.А. Пуанкаре, называют уравнениями в вариациях.

Таким образом, с математической точки зрения задача об устойчивости форм равновесия сводится к определению собственных чисел и собственных векторов линейной краевой задачи, описываемой дифференциальными уравнениями в вариациях с соответствующими краевыми условиями. Собственные числа определяют критические нагрузки, а собственные векторы, им соответствующие, — формы потери устойчивости. Физический интерес представляет только первое (наименьшее) собственное значение, так как высшие формы потери устойчивости могут быть вызваны только специальным возбуждением (типа ударных нагрузок).

Следует отметить, что проблема отыскания собственных чисел и определения критических нагрузок во многих случаях представляет собой весьма сложную математическую проблему, которая точно решена лишь для простейших случаев линейной задачи. Это связано с тем, что искомая функция должна удовлетворять не только основному дифференциальному уравнению (или уравнениям), но и граничным условиям. Например, задача устойчивости прямоугольной пластины решена для случаев свободно опертой пластины или пластины, две противоположные грани которой — свободно опертые, а две другие имеют произвольное закрепление [2, 3]. Но если речь идет о пластине, защемленной по всему контуру, или консольной пластине, то точного решения такие задачи не имеют. Использование тех или иных приближенных методов оставляет открытый вопрос о точности вычислений, облизости полученного решения к точному решению задачи.

Для сжатых стержней формула Эйлера получена в случае шарнирного опирания его концов. В работе [4] отмечается, что для других способов закрепления концов стержня можно использовать идею приведения к шарнирно-опертому стержню, но другой длины. В частности, для стержня, защемленного двумя концами, предлагается в формуле Эйлера вместо длины l стержня подставить величину вдвое меньшую. Эта идея основана на том, что изогнутая линия защемлен-

ного стержня имеет точки перегиба на расстоянии $l/4$ от его концов, и фактически точки перегиба можно считать шарнирами. Поэтому критическая сила для такого стержня будет в четыре раза больше, чем для шарнирно-опертого.

Эту идею можно использовать и для прямоугольной пластины, защемленной по контуру и нагруженной, помимо поперечной нагрузки, постоянными сжимающими усилиями, приложенными ко всем граням. Здесь также за основу можно принять решение для свободно опертой пластины в виде двойного тригонометрического ряда [2]. Это решение дает соотношение для определения критических сжимающих усилий в двух направлениях (решение Брайена). В случае защемленной пластины критические усилия должны быть большими, как и для стержня. Чтобы их найти, можно поступить следующим образом. Решение для свободно опертой пластины считается начальным приближением. Оно удовлетворяет дифференциальному уравнению изгиба и условиям отсутствия прогибов защемленных граней, но не удовлетворяет граничным условиям по угловым деформациям, т. е. порождает невязки. Для их устранения предлагается использовать два вида корректирующих (исправляющих) функций в виде гиперболо-тригонометрических рядов по двум координатам. Каждая из этих функций должна быть подчинена соответствующему однородному дифференциальному уравнению задачи. Она «автоматически» удовлетворяет условиям отсутствия прогибов на двух параллельных гранях (ряд по синусам). Граничные условия на двух смежных гранях будут удовлетворяться за счет неопределенных коэффициентов ряда. Первая исправляющая функция в свою очередь даст невязки по углам поворота двух других граней. Эти невязки призвана компенсировать вторая исправляющая функция подобного вида (с переменой координат). Она также порождает угловые невязки на двух других смежных гранях. И далее все повторяется, т. е. организуется бесконечный итерационный процесс наложения указанных функций, взаимно компенсирующих порождаемые ими невязки в граничных условиях. При достижении заданной точности процесс прекращается. В задачах механики, как правило, подобные процессы будут сходящимися, во всяком случае, помимо аналитического доказательства сходимости (что бывает весьма сложно), при компьютерной



реализации можно показать это численно, анализируя каждую итерацию и конечный результат.

Таким образом, решение задачи будет складываться из начального решения и n пар исправляющих функций. Эти функции и сделают повороты защемленных граней нулевыми. Однако начальное решение будет давать критическую нагрузку, соответствующую свободно опертой пластине. При этих значениях прогибы будут бесконечны, но это решение можно считать особым решением. Следует ожидать, что дальнейшее увеличение нагрузки даст конечные прогибы и критическая нагрузка будет достигнута при более высоких значениях, которые можно получить с помощью компьютерных вычислений. Кроме того, анализ формы изогнутой поверхности защемленной пластины, нагружен-

ной только поперечной нагрузкой, позволит приближенно найти линии перегибов и заменить (как и для стержня) данную пластину свободно опертой по этим линиям, которые приближенно будут давать прямоугольный контур меньших размеров. Критические усилия соответственно будут большими.

Подобный метод может быть использован и для решения других задач изгиба и устойчивости пластин и оболочек.

В заключение отметим, что во многих случаях получение точного решения задач о различных формах равновесия и устойчивости сопряжено с большими математическими трудностями, поэтому важное значение имеет разработка надежных приближенных методов, дающих решение, близкое к точному.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алфутов, Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем [Текст] / Н.А. Алфутов.— М.: Машиностроение, 1978.— 312 с.
2. Папкович, П.Ф. Строительная механика корабля. Ч. 2 [Текст] / П.Ф. Папкович.— Л.: Гос. союзное изд-во судостроит. промышленности, 1941.— 960 с.
3. Лехницкий, С.Г. Анизотропные пластины [Текст] / С.Г. Лехницкий.— М.-Л.: ГИТТЛ, 1947.— 355 с.
4. Беляев, Н.М. Сопротивление материалов [Текст] / Н.М. Беляев.— М.: ГИТТЛ, 1954.— 856 с.

УДК 517.929

И.Н. Зубов, С.В. Зубов,
С.А. Стрекопытов, М.В. Стрекопытова

УСТОЙЧИВОСТЬ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МНОГООБРАЗИЙ

В приложениях наиболее важным видом инвариантных множеств являются стационарные инвариантные множества общих систем, описываемых системами дифференциальных уравнений, которые определяют динамику функционирования системы управления и представляют собой множества в фазовом пространстве.

Постановка задачи

Рассмотрим систему

$$\dot{X} = \Theta(X), \quad (1)$$

где $X = (x_1, \dots, x_n)^*$ — вектор фазового состояния системы; $\Theta(X)$ — непрерывно дифференцируе-

мая функция. Пусть для системы (1) множество M есть пересечение k поверхностей:

$$\begin{aligned} \Phi_1(x_1, \dots, x_n) &= 0, \\ &\dots \\ \Phi_k(x_1, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

и является интегральным многообразием. Тогда из $X_0 \in M$ следует $X(t, X_0) \in M$ при $t \geq 0$, где $X(t, X_0)$ — решение (1), удовлетворяющее условию $X = X_0$ при $t = 0$. Будем называть множество (2) равновесным режимом системы (1) [1]. Пусть векторы $b_j = \nabla \Phi_j / \| \nabla \Phi_j \|$ ($j = 1, \dots, k$)

определенны или линейно независимы в каждой точке M . Построим в каждой точке $m \in M$ ортогональное дополнение к подпространству, наложеному на векторы b_1, b_2, \dots, b_k , и выберем в нем произвольный ортонормальный базис b_{k+1}, \dots, b_n . Пусть векторы b_1, b_2, \dots, b_n непрерывно дифференцируемы по компонентам вектора X в каждой точке M . Пусть $\rho(X, M)$ — расстояние от точки X до множества M ; $S(M, \delta)$ — множество таких точек X , что $\rho(X, M) < \delta$. Введем в рассмотрение P_m — нормальную к M k -мерную плоскость, определяемую уравнениями

$$(X - m, b_s |_{X=m}) = 0; \quad S = k+1, \dots, n \quad (3)$$

и проходящую через точку $m \in M$.

Рассмотрим систему n уравнений (2), (3). Применим теорему о неявной функции. Рассмотрим функциональный определитель этой системы относительно компонент вектора m [2]. Если Якобиан системы $n-k$ уравнений (3) относительно компонент вектора $m = (m_1, \dots, m_{n-k})^*$ отличен от нуля на M , то в некоторой окрестности M существует функция $m = m(X)$, непрерывно дифференцируемая по компонентам вектора X .

Введем новую систему координат y_1, \dots, y_n с центром в точке $m \in M$ и ортами b_1, \dots, b_n . Матрицу перехода обозначим B . Получим соотношения

$$\begin{aligned} X &= m(X) + BY; \\ Y &= B^{-1}(\dot{X} - m(X)). \end{aligned} \quad (4)$$

Отметим, что $y_{k+1} \equiv \dots \equiv y_n \equiv 0$. Это следует из (3), (4). Составим систему дифференциальных уравнений, которым удовлетворяют переменные y_1, \dots, y_k . Из (4), (1) следует

$$\dot{Y} = B^{-1} \left(-\dot{B}Y + \Theta(Y) - \frac{D_m}{DX} \Theta(X) \right). \quad (5)$$

Здесь

$$\frac{D_m}{DX} = \frac{D(m_1, \dots, m_n)}{D(x_1, \dots, x_n)} = \left\{ \frac{\partial m_i}{\partial x_j} \right\},$$

где $i, j = 1, \dots, n$.

Определение 1. Равновесный режим M называется *устойчивым*, если для каждого $\varepsilon > 0$ можно указать $\delta > 0$ такое, что при $\rho(X_0, M) < \delta$ будет $\rho(X(t, X_0), M) < \varepsilon$ для любого $t \geq 0$. Устойчивый режим называется *асимптотически устойчивым*,

если δ можно выбрать так, чтобы выполнялось $\rho(X(t, X_0), M) \xrightarrow[t \rightarrow +\infty]{} 0$ [3].

Система (1), (5) имеет интегральное многообразие

$$Y = 0, \quad \Phi_j(X) = 0, \quad (6)$$

где $j = 1, \dots, k$.

Определение 2. Интегральное многообразие (6) системы (1), (5) называется *устойчивым по отношению к компонентам вектора Y равномерно по отношению к компонентам вектора X* , если для каждого $\varepsilon > 0$ можно указать $\delta > 0$ такое, что в случае $\|Y_0\| < \delta$ будет $\|Y(t, Y_0, X_0)\| < \varepsilon$ при $t \geq 0$ для всех $X_0 \in E_n$. Если к тому же δ можно выбрать так, что выполняется $\varepsilon > 0$ равномерно по $X_0 \in E_n$, многообразие (6) называется *асимптотически устойчивым по отношению к компонентам вектора Y равномерно по отношению к компонентам вектора X* [4].

Теорема 1. Для устойчивости (асимптотической устойчивости) равновесного режима системы (1) необходимо и достаточно, чтобы семейство (6) было устойчиво (асимптотически устойчиво) по отношению к компонентам вектора Y равномерно по отношению к компонентам вектора X .

Доказательство. Необходимость. Пусть равновесный режим (2) системы (1) устойчив (асимптотически устойчив). Тогда с учетом соотношений (4) по определению для любого $\varepsilon > 0$ можно указать $\delta > 0$ такое, что при выполнении условия $\rho(X_0, M) = \|BY_0\| < \delta\sqrt{n}$ будет выполняться

$$\rho(X(t, X_0), M) = \|BY(t, Y_0, X_0)\| \leq \varepsilon\sqrt{n} \quad \text{при } t \geq 0 \text{ и}$$

$$\rho(X(t, X_0), M) = \|BY(t, Y_0, X_0)\| \rightarrow 0 \quad \text{при } t \rightarrow \infty,$$

т. е. иметь место устойчивость (асимптотическая устойчивость) семейства (6) относительно Y равномерно по X , так как X не входит в оценки выражений $\|BY_0\|, \|BY(t, Y_0, X_0)\|$.

Достаточность. Пусть семейство (6) устойчиво (асимптотически устойчиво) по отношению к компонентам вектора Y равномерно по отношению к компонентам вектора X . Тогда из (4) следует, что в случае $\forall \varepsilon > 0$ можно указать $\delta > 0$ такое, что при $\rho(X_0, M) = \|BY_0\| < \delta\sqrt{n}$ будет выполняться



$\rho(X(t, X_0), M) = \|BY(t, Y_0, X_0)\| < \varepsilon\sqrt{n}$ при $t \geq 0$

и $\rho(X(t, X_0), M) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$,

т. е. режим (2) системы (1) устойчив (асимптотически устойчив) [5].

Определение 3. Функция $V(Y, X)$ называется положительно определенной по отношению к компонентам вектора Y равномерно по X , если выполнены следующие условия:

1) $V(Y, X)$ задана при $X \in E_n$, $\|Y\| < \alpha$ как вещественная и непрерывная, причем $V(0, X) = 0$; α — некоторая положительная постоянная;

2) для достаточно малого $C_2 > 0$ можно указать такое $C_1 > 0$, что в случае $\|Y\| > C_2$ будет $V(Y, X) > C_1$ при $X_0 \in E_n$.

Теорема 2. Многообразие (2) системы (1) будет устойчивым, если существует функция $V(Y, X)$, удовлетворяющая условиям:

1) $V(Y, X)$ — положительно определенная по отношению к компонентам вектора Y равномерно по X ;

2) функция $V(Y, X) \underset{Y \rightarrow 0}{\rightarrow} 0$ равномерно по отношению к $X_0 \in E_n$;

3) полная производная функции $V(Y, X)$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial X} \dot{X} + \frac{\partial V}{\partial Y} \dot{Y} = W(Y, X)$$

в силу системы (4) непрерывна и неположительна.

Доказательство. Зафиксируем $\varepsilon > 0$ и рассмотрим сферу $\|Y\| = \varepsilon$. Найдем наименьшее значение $V(Y, X)$, $X_0 \in E_n$ на этой сфере. Это, очевидно, можно сделать в силу первого условия.

Пусть при $\|Y\| = \varepsilon$, $X_0 \in E_n$

$$\inf V(Y, X) = \lambda.$$

В силу непрерывности $V(Y, X)$ существует $\delta > 0$ такое, что $V(Y, X) < \lambda$ для $\|Y\| < \delta$, $X_0 \in E_n$. Покажем, что это δ отвечает ε в определении 2. Пусть $\|Y\| < \delta$. Тогда $V(Y_0, X_0) < \lambda$ при $X_0 \in E_n$, и поскольку V не возрастает в силу третьего условия, то

$$\|Y(t, Y_0, X_0)\| < \delta \text{ при } t \geq 0, X_0 \in E_n.$$

Следовательно,

$$\|Y(t, Y_0, X_0)\| < \varepsilon \text{ при } t \geq 0, X_0 \in E_n,$$

ибо в противном случае существует $T > 0$ такое, что $\|Y(T, Y_0, X_0)\| = \varepsilon$. Тогда $V(Y(T, Y_0, X_0), X(T, Y_0, X_0)) \geq \lambda$. Полученное противоречие показывает, что при выполнении условий теоремы интегральное многообразие (6) устойчиво к компонентам вектора X . Следовательно, по теореме 1 равновесный режим (2) системы (1) устойчив. Теорема доказана.

В статье показана острота проблемы устойчивости интегральных многообразий, обусловленная тем, что основным аппаратом исследования нелинейных систем дифференциальных уравнений служит численное интегрирование с помощью ЭВМ. При таком исследовании, как уже было отмечено, возможны не только неточности, но и принципиальные ошибки в оценке характера поведения траекторий системы. Выходом из этого положения может быть построение консервативных численных алгоритмов, учитывающих наличие интегральных многообразий интегрируемых нелинейных систем. Если речь идет об интегральных многообразиях, то нахождение стационарных интегралов или доказательство их существования фактически сводится к задаче интегрирования заданной системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (пр. № 10-08-00624).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зубов, И.В.** Анализ управляемых систем и равновесных движений [Текст] / И.В. Зубов, Н.В. Зубов, М.В. Стрекопытова. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2009.— 326 с.

2. **Зубов, А.В.** Динамическая безопасность управляемых систем [Текст] / А.В. Зубов, Н.В. Зубов.— СПб.: Изд-во НИИ Химии СПбГУ, 2009.— 172 с.

3. **Зубов, Н.В.** Безопасность функционирования технических систем [Текст] / Н.В. Зубов, А.Ф. Зу-

бова.— СПб.: Изд-во НИИ Химии СПбГУ, 2010.— 342 с.

4. **Блистанова, Л.Д.** Проблемы устойчивости матриц и вычислительных алгоритмов [Текст] / Л.Д. Блистанова, Г.А. Зеленков, И.В. Зубов, Н.В. Зубов.— СПб.: Изд-во НИИ Химии СПбГУ, 2007.— 150 с.

5. **Зубов, А.В.** Динамика управляемых систем [Текст] / А.В. Зубов, Н.В. Зубов, В.Н. Лаптинский.— СПб.: Изд-во «ВВМ», 2008.— 336 с.

УДК 539.384: 629.12.011.001.24

С.О. Барышников, М.В. Сухотерин

К РАСЧЕТУ СУДОВЫХ ДНИЩЕВЫХ ПЛАСТИН

Изгиб пластин, лежащих на сплошном упругом основании, представляет для судостроительной науки интерес с точки зрения расчета днищевых пластин, воспринимающих от киль-блоков реактивные давления килевой дорожки и передающих его силовому набору судна. Эта же проблема возникает при расчете плоского киля при постановке судна в доке. В гидротехнике днища камер шлюзов, лежащих на грунте, также можно рассматривать как плиты на упругом основании. Известные решения получены для шарнирно опертой пластины [1] и пластины, две противоположные кромки которой защемлены, а две другие свободно оперты [2]. Между тем во многих случаях расчетной схемой является пластина, защемленная по всем граням. Эта задача — более сложная и не имеет точного решения в замкнутой форме, а ее приближенные решения оставляют открытым вопрос о точности результатов.

Рассмотрим прямоугольную защемленную пластину (панель) с размерами в плане $a \times b$ постоянной толщины h , лежащую на упругом основании и нагруженную с противоположной стороны равномерной поперечной нагрузкой q_0 . Обозначим через ρ коэффициент постели, характеризующий жесткость основания. Начало системы координат XOY поместим в центр пластины.

Дифференциальное уравнение изгиба такой пластины имеет вид [1, 2]

$$D\nabla^2\nabla^2W = q_0 - \rho W, \quad (1)$$

где W — прогиб срединной поверхности пласти-

ны; $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ — цилиндрическая жесткость

пластины; E — модуль Юнга; ν — коэффициент

Пуассона; $\nabla^2\nabla^2 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4}{\partial x^2\partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}$ — бигармонический оператор.

Здесь реакция упругого основания считается пропорциональной его прогибу. Такое основание принято называть винклеровым.

Перейдем к безразмерным координатам $x = X/b$, $y = Y/b$. Тогда уравнение (1) можно привести к виду

$$\nabla^2\nabla^2w + R^2w = 1, \quad (2)$$

где $w = \frac{W D}{q_0 b^4}$ — относительный прогиб; $R = \sqrt{\frac{\rho b^4}{D}}$.

Относительные размеры пластины будут такими: $-\gamma/2 \leq x \leq \gamma/2$, $-1/2 \leq y \leq 1/2$, где $\gamma = a/b$ — отношение сторон пластины.

Границные условия на защемленных кромках имеют вид:

$$x = \pm\gamma/2: w = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

$$y = \pm 1/2: w = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial y} = 0. \quad (4)$$

Разложим правую часть уравнения (2) в двойной ряд Фурье вида

$$1 = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} q_{ks} \cos(\mu_s x) \cos(\lambda_k y), \quad (5)$$

где $\mu_s = s\pi/\gamma$; $\lambda_k = k\pi$;

$$q_{ks} = \frac{4}{\gamma} \int_{-\gamma/2}^{\gamma/2} \int_{-1/2}^{1/2} \cos(\mu_s x) \cos(\lambda_k y) dx dy = \\ = \frac{16}{\gamma} \frac{(-1)^{\tilde{k}+1} (-1)^{\tilde{s}+1}}{\lambda_k \mu_s}, \quad (6)$$

Здесь $\tilde{k} = (k+1)/2$, $\tilde{s} = (s+1)/2$. Тогда уравнение (2) примет вид:

$$\nabla^2\nabla^2w + R^2w =$$

$$= \frac{16}{\gamma} \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{k}+1} (-1)^{\tilde{s}+1} \times \\ \times \frac{\cos(\mu_s x) \cos(\lambda_k y)}{\mu_s \lambda_k}. \quad (7)$$

Задача ставится так: найти функцию прогибов $w(x, y)$, удовлетворяющую дифференциальному уравнению (7) и граничным условиям (3), (4).



Начальный компонент решения выберем в виде

$$w_0(x, y) = \frac{16}{\gamma} \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} g_{ks} \frac{(-1)^{\tilde{k}} (-1)^{\tilde{s}}}{\lambda_k \mu_s} \times \cos(\mu_s x) \cos(\lambda_k y), \quad (8)$$

где g_{ks} — неопределенные коэффициенты.

Функция (8) удовлетворяет условиям отсутствия прогибов защемленных граней. Потребуем, чтобы она удовлетворяла и дифференциальному уравнению изгиба (7). Тогда для отыскания коэффициентов g_{ks} получаем уравнение $(\mu_s^4 + 2\mu_s^2\lambda_k^2 + \lambda_k^4 + R^2)g_{ks} = 1$, из которого следует

$$g_{ks} = \frac{1}{(\lambda_k^2 + \mu_s^2)^2 + R^2}. \quad (9)$$

Начальное решение (8) не удовлетворяет лишь условиям отсутствия углов поворота заданных сечений (вторые условия в (3), (4)). Нарушения граничных условий обычно называют невязками.

Итак, невязки от w_0 имеют вид

$$\theta_{x0} \Big|_{x=\frac{\gamma}{2}} = \frac{\partial w_0}{\partial x} \Big|_{x=\frac{\gamma}{2}} = - \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{k}+1} \alpha_{k0} \cos(\lambda_k y); \quad (10)$$

$$\theta_{y0} \Big|_{y=\frac{1}{2}} = \frac{\partial w_0}{\partial y} \Big|_{y=\frac{1}{2}} = - \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{s}+1} \alpha_{s0}^* \cos(\mu_s x), \quad (11)$$

где

$$\alpha_{k0} = \frac{16}{\gamma \lambda_k} \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{(\lambda_k^2 + \mu_s^2)^2 + R^2};$$

$$\alpha_{s0}^* = \frac{16}{\gamma \mu_s} \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{(\lambda_k^2 + \mu_s^2)^2 + R^2}. \quad (12)$$

Заметим, что на противоположных гранях выражения (10) и (11) поменяют знак.

Чтобы «убрать» невязки (10), (11), поступим следующим образом. Добавим к начальному решению w_0 функцию следующего вида:

$$w_1(x, y) = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{k}+1} H_k \operatorname{ch}(\beta_k x) \cos(\lambda_k y), \quad (13)$$

где H_k, β_k — неопределенные коэффициенты.

Потребуем, чтобы эта функция удовлетворяла соответствующему однородному дифференциальному уравнению задачи

$$\nabla^2 w + R^2 w = 0. \quad (14)$$

Тогда для определения коэффициентов β_k получаем уравнение $\beta_k^4 - 2\lambda_k^2\beta_k^2 + \lambda_k^4 + R^2 = 0$, которое дает комплексные корни $\beta_k^2 = \lambda_k^2 \pm iR$.

Отсюда

$$\beta_k = a_k + ib_k, \quad \bar{\beta}_k = a_k - ib_k, \quad (15)$$

где

$$a_k = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\lambda_k^2 + \sqrt{\lambda_k^4 + R^2} \right)}, \quad b_k = \frac{R}{2a_k}. \quad (16)$$

Поскольку вместо одной последовательности коэффициентов β_k получено две (15), то функция (13) перепишется в виде

$$w_1(x, y) = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{k}+1} \left(H_k \operatorname{ch}(\beta_k x) + H_k^* \operatorname{ch}(\bar{\beta}_k x) \right) \times \cos(\lambda_k y), \quad (17)$$

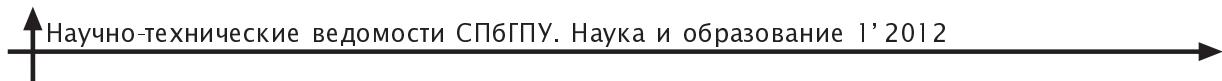
где коэффициенты H_k и H_k^* должны быть такими, чтобы функция (17) удовлетворяла граничным условиям (3), т. е. компенсировала бы невязку (10). (Невязкой (11) мы займемся позже.) Это дает систему двух уравнений

$$\begin{cases} H_k \operatorname{ch} \frac{\beta_k \gamma}{2} + H_k^* \operatorname{ch} \frac{\bar{\beta}_k \gamma}{2} = 0; \\ H_k \beta_k \operatorname{sh} \frac{\beta_k \gamma}{2} + H_k^* \bar{\beta}_k \operatorname{sh} \frac{\bar{\beta}_k \gamma}{2} = \alpha_{k0}, \end{cases} \quad (18)$$

из которой получим

$$H_k = \frac{\alpha_{k0}}{\operatorname{ch} \frac{\beta_k \gamma}{2} \left(\beta_k \operatorname{th} \frac{\beta_k \gamma}{2} - \bar{\beta}_k \operatorname{th} \frac{\bar{\beta}_k \gamma}{2} \right)};$$

$$H_k^* = -H_k \operatorname{ch} \frac{\beta_k \gamma}{2} / \operatorname{ch} \frac{\bar{\beta}_k \gamma}{2}. \quad (19)$$



Ядро ряда (17) в силу (15) представляет собой комплексную функцию переменной x . Однако после подстановки корней (15) и преобразований получаем функцию действительной переменной, и ряд (17) примет вид

$$w_1(x, y) = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\bar{k}+1} \left[A_k \operatorname{sh}(a_k x) \sin(b_k x) + B_k \operatorname{ch}(a_k x) \cos(b_k x) \right] \cos(\lambda_k y), \quad (20)$$

где

$$A_k = \frac{2 \operatorname{ch} \frac{a_k \gamma}{2} \cos \frac{b_k \gamma}{2}}{a_k \sin b_k \gamma + b_k \operatorname{sh} a_k \gamma} \alpha_{k0};$$

$$B_k = -A_k \operatorname{th} \frac{a_k \gamma}{2} \operatorname{tg} \frac{b_k \gamma}{2}. \quad (21)$$

Функция прогибов (17) (или, что то же самое, (20)) на гранях $y = \pm 1/2$ не дает прогибов, но порождает угловые деформации заделанных сечений, т. е. дает невязки, подобные (11):

$$\theta_{y1} \Big|_{y=\frac{1}{2}} = \frac{\partial w_1}{\partial y} \Big|_{y=\frac{1}{2}} = - \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \lambda_k \left[H_k \operatorname{ch}(\beta_k x) + H_k^* \operatorname{ch}(\bar{\beta}_k x) \right]. \quad (22)$$

Разложим гиперболические косинусы в ряды Фурье:

$$\operatorname{ch}(\beta_k x) = \frac{4}{\gamma} \operatorname{ch} \frac{\beta_k \gamma}{2} \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\bar{s}+1} \frac{\mu_s \cos(\mu_s x)}{\beta_k^2 + \mu_s^2},$$

$$\operatorname{ch}(\bar{\beta}_k x) = \frac{4}{\gamma} \operatorname{ch} \frac{\bar{\beta}_k \gamma}{2} \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\bar{s}+1} \frac{\mu_s \cos(\mu_s x)}{\bar{\beta}_k^2 + \mu_s^2}. \quad (23)$$

Подставляя (23) в (22) и переставляя знаки суммирования, после преобразований получим

$$\theta_{y1} \Big|_{y=\frac{1}{2}} = \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\bar{s}+1} \alpha_{s1}^* \cos(\mu_s x), \quad (24)$$

где

$$\alpha_{s1}^* = \frac{4}{\gamma} R \mu_s \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\operatorname{ch}(a_k \gamma) + \cos(b_k \gamma)}{a_k \sin(b_k \gamma) + b_k \operatorname{sh}(a_k \gamma)} \times$$

$$\times \frac{\lambda_k \alpha_{k0}}{(\lambda_k^2 + \mu_s^2)^2 + R^2}. \quad (25)$$

Сложим теперь невязки (11) и (24):

$$\theta_{yI} \Big|_{y=\frac{1}{2}} = \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\bar{s}+1} \alpha_{sI}^* \cos(\mu_s x). \quad (26)$$

Здесь $\alpha_{sI}^* = \alpha_{s1}^* - \alpha_{s0}^*$.

Чтобы устраниТЬ невязки (26), добавим к решению функцию, аналогичную (13):

$$w_2(x, y) = \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\bar{s}+1} L_s \operatorname{ch}(\xi_s y) \cos(\mu_s x), \quad (27)$$

где ξ_s , L_s подлежат определению. Подчиняя эту функцию однородному дифференциальному уравнению изгиба (14), получим для коэффициентов ξ_s уравнение $\xi_s^4 - 2\mu_s^2 \xi_s^2 + \mu_s^4 + R^2 = 0$, которое дает комплексные корни $\xi_s^2 = \mu_s^2 \pm iR$. Отсюда

$$\xi_s = p_s + iq_s, \quad \bar{\xi}_s = p_s - iq_s, \quad (28)$$

где

$$p_s = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\mu_s^2 + \sqrt{\mu_s^4 + R^2} \right)}, \quad q_s = \frac{R}{2p_s}. \quad (29)$$

Заметим, что формулы (28), (29) аналогичны (15), (16). С учетом (28) функция (27) запишется в виде

$$w_2(x, y) = \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\bar{s}+1} \left[L_s \operatorname{ch}(\xi_s y) + L_s^* \operatorname{ch}(\bar{\xi}_s y) \right] \cos(\mu_s x). \quad (30)$$

Потребуем, чтобы она удовлетворяла условиям (4) на грани $y = \pm 1/2$, компенсируя при этом невязку (26). Тогда для определения коэффициентов L_s , L_s^* получим систему, аналогичную (18):

$$\begin{cases} L_s \operatorname{ch} \frac{\xi_s}{2} + L_s^* \operatorname{ch} \frac{\bar{\xi}_s}{2} = 0; \\ L_s \xi_s \operatorname{sh} \frac{\xi_s}{2} + L_s^* \bar{\xi}_s \operatorname{sh} \frac{\bar{\xi}_s}{2} = -\alpha_{sI}^*, \end{cases} \quad (31)$$

из которой находим

$$L_s = -\frac{\alpha_{sI}^*}{\operatorname{ch} \frac{\xi_s}{2} \left(\xi_s \operatorname{th} \frac{\xi_s}{2} - \bar{\xi}_s \operatorname{th} \frac{\bar{\xi}_s}{2} \right)},$$

$$L_s^* = -L_s \operatorname{ch} \frac{\xi_s}{2} / \operatorname{ch} \frac{\bar{\xi}_s}{2}. \quad (32)$$

Комплексная функция (32) после подстановки в нее корней (28) и последующих преобразований приводится к действительной форме:

$$w_2(x, y) = \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{s+1} [C_s \operatorname{sh}(p_s y) \sin(q_s y) + D_s \operatorname{ch}(p_s y) \cos(q_s y)] \cos(\mu_s x), \quad (33)$$

где

$$C_s = -2 \frac{\operatorname{ch} \frac{p_s}{2} \cos \frac{q_s}{2}}{p_s \sin q_s + q_s \operatorname{sh} p_s} \alpha_{sI}^*,$$

$$D_s = -C_s \operatorname{th} \frac{p_s}{2} \operatorname{tg} \frac{q_s}{2}. \quad (34)$$

Функция (30), удовлетворяет условию отсутствия прогибов граней $x = \pm\gamma/2$, но подобно функции (17) дает угловые деформации этих граней:

$$\theta_{x1} \Big|_{x=\gamma/2} = \frac{\partial w_2}{\partial x} \Big|_{x=\gamma/2} = - \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} \mu_s (L_s \operatorname{ch} \xi_s y + L_s^* \operatorname{ch} \bar{\xi}_s y). \quad (35)$$

Разлагая гиперболические косинусы в ряды Фурье по формулам, аналогичным (23),

$$\operatorname{ch} \xi_s y = 4 \operatorname{ch} \frac{\xi_s}{2} \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{k+1} \frac{\lambda_k \cos(\lambda_k y)}{\xi_s^2 + \lambda_k^2},$$

$$\operatorname{ch} \bar{\xi}_s y = 4 \operatorname{ch} \frac{\bar{\xi}_s}{2} \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{k+1} \frac{\lambda_k \cos(\lambda_k y)}{\bar{\xi}_s^2 + \lambda_k^2}, \quad (36)$$

подставляя (28), (29) в (35) и переставляя знаки суммирования, получим

$$\theta_{x1} \Big|_{x=\gamma/2} = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{k+1} \alpha_{k1} \cos(\lambda_k y), \quad (37)$$

где

$$\alpha_{k1} = -4 R \lambda_k \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\operatorname{ch} p_s + \cos q_s}{p_s \sin q_s + q_s \operatorname{sh} p_s} \times$$

$$\times \frac{\mu_s \alpha_{sI}^*}{(\lambda_k^2 + \mu_s^2)^2 + R^2}. \quad (38)$$

Для исправления этих невязок вновь привлекается функция вида (20) (но с другими коэффициентами A_{k1} , B_{k1}):

$$w_{11}(x, y) = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{k+1} [A_{k1} \operatorname{sh}(a_k x) \sin(b_k x) + B_{k1} \operatorname{ch}(a_k x) \cos(b_k x)] \cos(\lambda_k y), \quad (39)$$

где a_k , b_k находятся по формуле (16), а коэффициенты A_{k1} , B_{k1} — по формулам, аналогичным (21) (отличаются знаком у A_{k1}):

$$A_{k1} = -2 \frac{\operatorname{ch} \frac{a_k \gamma}{2} \cos \frac{b_k \gamma}{2}}{a_k \sin(b_k \gamma) + b_k \operatorname{sh}(a_k \gamma)} \alpha_{k1},$$

$$B_{k1} = -A_{k1} \operatorname{th} \frac{a_k \gamma}{2} \operatorname{tg} \frac{b_k \gamma}{2}. \quad (40)$$

Затем для исправления угловых невязок от

$$w_{11}(x, y)$$

$$\theta_{y2} \Big|_{y=\gamma/2} = \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{s+1} \alpha_{s2}^* \cos(\mu_s x), \quad (41)$$

где

$$\alpha_{s2}^* = -\frac{4}{\gamma} R \mu_s \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\operatorname{ch}(a_k \gamma) + \cos(b_k \gamma)}{a_k \sin(b_k \gamma) + b_k \operatorname{sh}(a_k \gamma)} \times$$

$$\times \frac{\lambda_k \alpha_{k1}}{(\lambda_k^2 + \mu_s^2)^2 + R^2}, \quad (42)$$

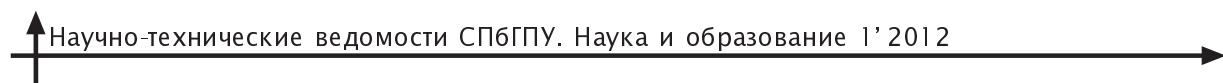
вновь привлекается функция вида (33)

$$w_{21}(x, y) = \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{s+1} [C_{s1} \operatorname{sh}(p_s y) \sin(q_s y) + D_{s1} \operatorname{ch}(p_s y) \cos(q_s y)] \cos(\mu_s x), \quad (43)$$

где коэффициенты p_s , q_s находятся по формулам (29), а коэффициенты C_{s1} , D_{s1} — по формулам, аналогичным (34):

$$C_{s1} = -2 \frac{\operatorname{ch} \frac{p_s}{2} \cos \frac{q_s}{2}}{p_s \sin q_s + q_s \operatorname{sh} p_s} \alpha_{s2}^*,$$

$$D_{s1} = -C_{s1} \operatorname{th} \frac{p_s}{2} \operatorname{tg} \frac{q_s}{2}. \quad (44)$$



Таким образом, приходим к бесконечному итерационному процессу взаимного попарного исправления углов поворота заделанных сечений. Для сходимости итерационных решений к точному решению задачи невязки должны убывать по абсолютной величине с ростом числа итераций. При достижении заданной точности процесс можно остановить.

Решение исходной задачи запишется в виде

$$w(x, y) = w_0(x, y) + \sum_{n=1}^{\infty} w_{1n}(x, y) + w_{2n}(x, y), \quad (45)$$

где n — номер итерации. С учетом формул (8), (20), (33) функцию прогибов можно представить следующим выражением:

$$\begin{aligned} w(x, y) = & \\ = & \frac{16}{\gamma} \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} g_{ks} \frac{(-1)^{\tilde{k}} (-1)^{\tilde{s}}}{\lambda_k \mu_s} \cos(\mu_s x) \cos(\lambda_k y) + \\ & + \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{k}+1} [A_{k\Sigma} \operatorname{sh}(a_k x) \sin(b_k x) + \\ & + B_{k\Sigma} \operatorname{ch}(a_k x) \cos(b_k x)] \cos(\lambda_k y) + \\ & + \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^{\tilde{s}+1} [C_{s\Sigma} \operatorname{sh}(p_s y) \sin(q_s y) + \\ & + D_{s\Sigma} \operatorname{ch}(p_s y) \cos(q_s y)] \cos(\mu_s x), \quad (46) \end{aligned}$$

где ввиду линейности задачи фигурируют суммарные значения коэффициентов по всем итерациям

$$A_{k\Sigma} = A_{k1} + A_{k2} + \dots + A_{kn};$$

.....

$$D_{s\Sigma} = D_{s1} + D_{s2} + \dots + D_{sn}.$$

Приведем весьма простой алгоритм численной реализации метода.

Исходными данными являются: коэффициент постели ρ , коэффициент Пуассона v , модуль

Юнга E , размеры пластины a и b , толщина пластины h . Задаются также количество членов n , удерживаемых в рядах, и число итераций N . Затем вычисляются значения коэффициентов g_{ks} (9), α_{k0} и α_{s0}^* (12), а также a_k , b_k (16) и p_s , q_s (29). Они заполняют соответствующие числовые массивы. Затем организуется цикл по числу итераций n , в котором последовательно вычисляются коэффициенты α_{s1}^* (25), $\alpha_{sI}^* = \alpha_{s1}^* - \alpha_{s0}^*$, α_{k1} (38), α_{s2}^* (42), α_{k2} по формуле, аналогичной (38), с заменой α_{sI}^* на α_{s2}^* и т. д. При этом вычисляются суммарные значения этих коэффициентов по всем итерациям, а по ним — суммарные значения $A_{k\Sigma}, \dots, D_{s\Sigma}$. Наконец, по формуле (46) вычисляются прогибы любой точки срединной поверхности пластины.

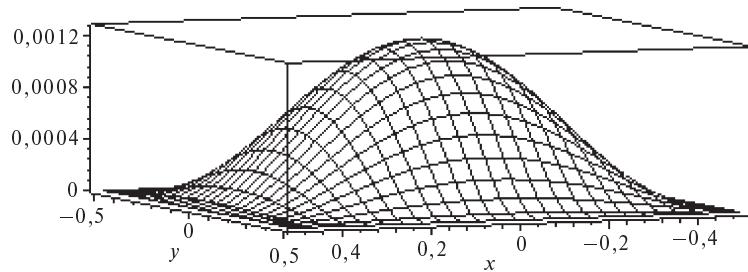
Изгибающие моменты (безразмерные) рассчитываются по формулам [2]

$$\begin{aligned} M_x &= -\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \\ M_y &= -\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + v \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right), \quad (47) \end{aligned}$$

а по ним определяются напряжения σ_x , σ_y .

Под данному алгоритму была составлена программа в системе аналитических вычислений «Maple 14». Программа позволяет контролировать вычислительный процесс для каждой итерации, исследовать влияние количества членов, удерживаемых в рядах, и количества итераций, а также коэффициента постели на величину прогибов пластины.

В качестве примера вычислялись прогибы квадратной пластины с весьма малым коэффициентом постели $\rho = 0,001$, чтобы убедиться в близости результатов для аналогичной пласти-



Изогнутая поверхность квадратной пластины ($\rho = 0,001$)



ны без упругого основания. Изогнутая поверхность пластины представлена на рисунке.

Размеры пластины $1 \times 1 \times 0,02$ м. Наибольший относительный прогиб — 0,00126525 — имеет место в середине пластины (число членов в рядах — $n = 299$, число итераций — $N = 12$); для обычной пластины — 0,00126 [2].

Отметим, что пятая значащая цифра в прогибах не изменялась уже начиная с $n = 199$ и $N = 10$.

Невязки выполнения граничных условий убывали по абсолютной величине по геометрической прогрессии весьма быстро. Это подтверждает быструю сходимость итерационных решений к точному решению задачи.

Следующее значение коэффициента постепенно принималось равным $\rho = 0,01$, наибольший прогиб составил 0,0012584; при $\rho = 10$ получили прогиб 0,00080932, при $\rho = 100$ — 0,00016809.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Папкович, П.Ф. Строительная механика корабля. Ч. II [Текст] / П.Ф. Папкович.— Л.: Гос. союзное изд-во судостр. промыш-сти, 1941. 960 с.

2. Тимошенко, С.П. Пластины и оболочки [Текст] / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер.— М.: Физматгиз, 1963.— 635 с.

УДК 621.515.1

В.А. Голиков, А.А. Жарковский, Г.И. Топаж

ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЯ И АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛОПАСТНЫХ ГИДРОМАШИН

На кафедре гидромашиностроения энергомашиностроительного факультета СПбГПУ разработаны методы и комплексы программ для автоматизированного проектирования лопастных гидромашин. Комплексы используются при создании проточных частей по договорам с промышленностью, в учебном процессе, внедрены в ряде организаций. Кратко опишем данные комплексы программ.

Метод расчета осесимметричного и квазитрехмерного потока в проточных частях лопастных гидромашин разработан В.И. Климовичем. Пакет программ, реализующий этот подход, позволяет рассчитать течение как в осесимметричной, так и в полной квазитрехмерной постановках. Метод используется в качестве базового в пакетах других разработчиков. В пакете имеется возможность автоматизированной подготовки исходных данных по геометрии лопастных систем, необходимых для расчетов по заданному открытию направляющего аппарата и углу установки лопастей рабочего колеса (РК). На рис. 1 показаны результаты расчетов течения в проточной части гидротурбины Миат-

линской ГЭС, а на рис. 2, 3 — течений в проточной части центробежного насоса ГЦНА-1391, полученные на основе квазитрехмерного подхода.

Комплекс программ «Гидродинамический расчет насосов и турбин» («ГРаНИТ») разработан кандидатом технических наук А.В. Захаровым и доктором технических наук Г.И. Топажем. Комплекс обобщает и развивает традиции научной деятельности кафедры гидромашиностроения СПбГПУ в направлении расчета гидродинамических показателей лопастных гидромашин. Опыт проектирования лопастных гидромашин показал, что математические модели, основанные на квазитрехмерных методах расчета, позволяют достаточно полно отразить физические процессы, происходящие в проточной части. В связи с этим при создании АПК «ГРаНИТ» авторы, помимо собственных программ, использовали хорошо зарекомендовавших себя в инженерной практике разработки других исследователей (в частности, Б.С. Раухмана, В.И. Климовича, М.И. Жуковского), базирующиеся на решении прямых и обратных квазитрехмерных задач.

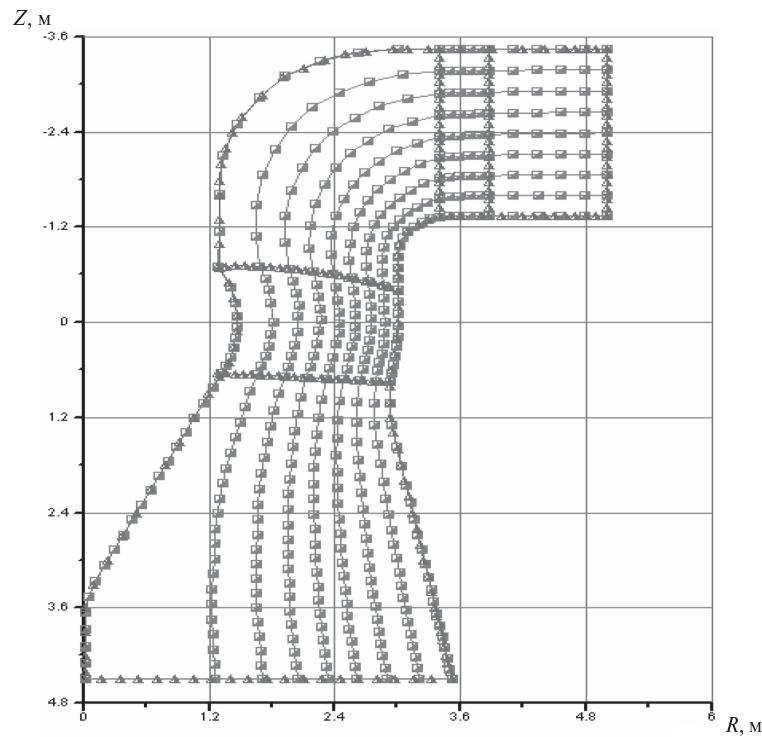


Рис. 1. Линии тока в проточной части ПЛ-60/1075

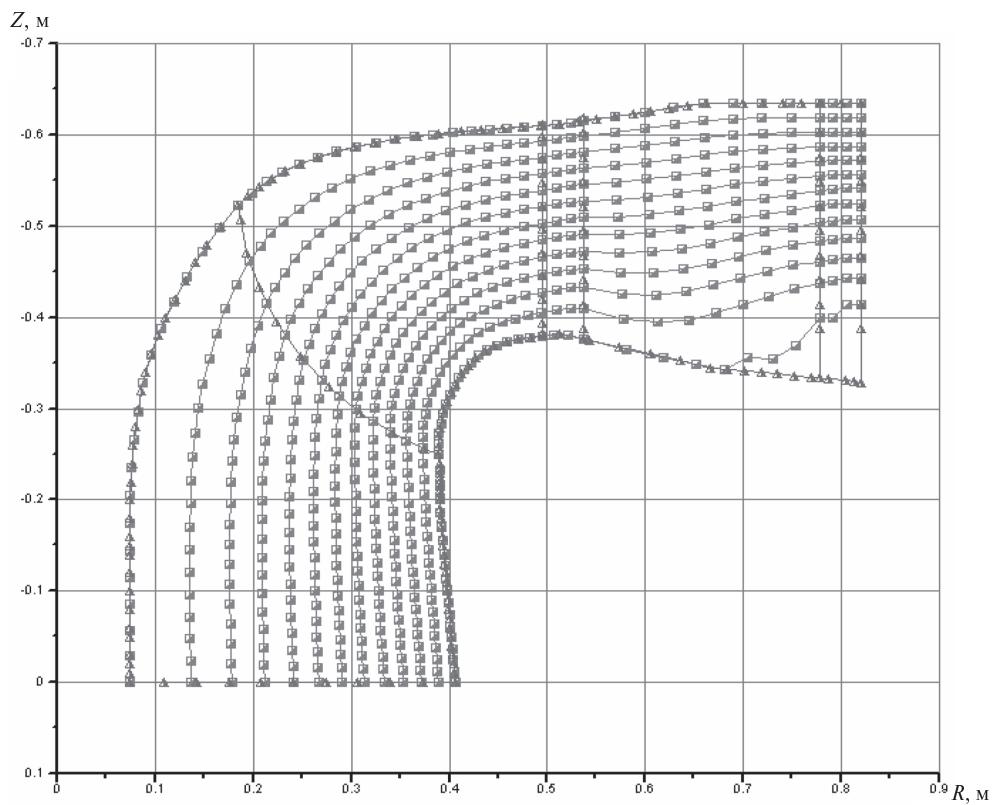


Рис. 2. Распределение меридиональных линий тока в проточной части ГЗНА-1391 на оптимальном режиме при подаче $Q = 22040 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($Q = 6,111 \text{ м}^3/\text{с}$)

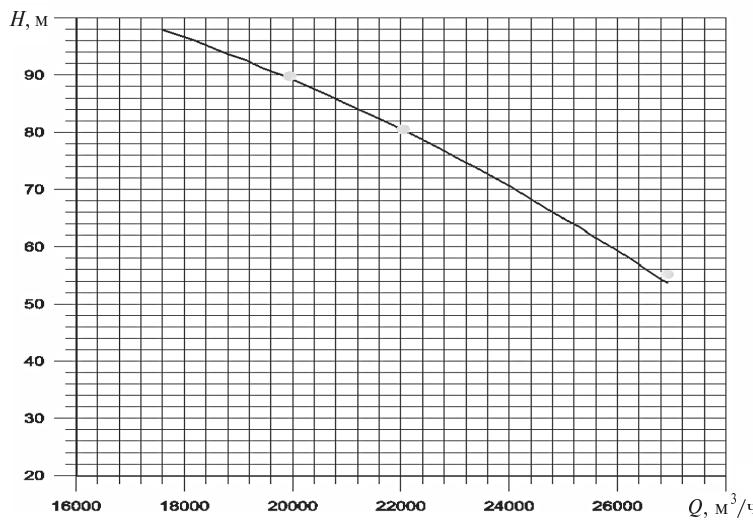


Рис. 3. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений напоров создаваемых ГЧНА-1391
(— — эксперимент, ● — расчет)

Комплекс позволяет: 1) определить кинематику квазитрехмерного потока в лопастных системах направляющего аппарата (НА) и рабочего колеса (РК), а также в осесимметричных областях проточной части перед и за лопастными системами; 2) определить расход и мощность гидромашины при различных открытиях НА и углах установки лопастей РК (для поворотно-лопастных гидромашин); 3) найти различные виды гидравлических потерь в элементах проточной части, объемные и дисковые потери, а также КПД гидромашины на расчетных режимах; 4) определить кавитационные показатели гидромашины на различных режимах; 5) определить нагрузки, действующие на лопатки НА и лопасти РК на расчетных режимах; 6) построить прогнозную универсальную характеристику гидротурбины, рабочие и эксплуатационные характеристики гидромашины.

Используя его, можно определять как локальные гидравлические, так и их интегральные показатели гидромашины. Указанные выше задачи решаются для различной компоновки проточной части гидротурбины или насоса (вертикальная, горизонтальная или диагональная), состоящей из осесимметричных поверхностей проточного тракта и максимум двух лопастных систем произвольной формы. Конструкции лопастных систем могут быть жестколопастные или поворотно-лопастные, врачающиеся или неподвижные. Вы-

бор режима может быть произвольным или определяться в зависимости от расположения и углов установки лопастных систем в проточной части. В программный комплекс входит также пакет геометрических программ, предназначенный для преобразования информации о геометрии элементов проточной части к виду, необходимому для решения прикладных задач. В частности, в этот пакет входят программы определения форм сечений лопасти произвольной плоскостью или осесимметричной поверхностью, расчета координат поверхности лопасти при повороте ее на заданный угол вокруг выбранной оси, определения величины открытия направляющего аппарата при различных углах его поворота. Ряд программ этого пакета предназначен для выполнения различных модификаций контуров проточной части и поверхности лопасти, а также для построения их теоретических чертежей.

Головное окно содержит краткую информацию о текущем проекте. Левая верхняя информационная панель заключает в себе общие данные о проекте. Правая верхняя панель головного окна содержит список результатов, относящихся к тем или иным расчетным задачам. Если текущий расчет успешно завершен и отвечающие ему результаты получены, загораются соответствующие зеленые лампочки. При нажатии на лампочку правой кнопкой мыши появляется всплывающее меню, позволяющее пользовате-

лю просмотреть результаты решения данной задачи, сохранить их во внешнем файле, удалить из проекта, пересчитать приведенные величины на натурные условия и т. д. Правая и левая нижние информационные панели содержат данные, относящиеся соответственно к первой и второй лопастным системам. В нижней части главного окна программы-монитора расположен индикатор выполнения расчетного процесса. Он позволяет оперативно отслеживать в процентном отношении долю выполненных расчетных операций во время решения конкретной вычислительной задачи. Под индикатором имеется небольшая панель, в которой дается информация о процессе решения задачи «кинематика потока», занимающей максимальное время работы АПК. Указывается количество выполненных глобальных итераций при решении этой задачи.

Эффективность данного программного комплекса была проверена многочисленными расчетными исследованиями радиально-осевых и поворотно-лопастных гидротурбин различной быстротходности. Кинематика квазитрехмерного потока, полученная на основе данного комплекса, сопоставлялась с результатами решения трехмерной задачи другими авторами, а также с экспериментальными данными, они хорошо сходятся. Сопоставимость расчетных интегральных гидравлических параметров с экспериментальными данными также находится на достаточноном для инженерной практики уровне. Достоинством АПК «ГРаНИТ» можно считать

то, что для его работы не требуется значительных вычислительных ресурсов. Расчет кинематики потока в проточной части гидромашины и определение ее гидравлических характеристик на заданном режиме занимает несколько минут. Разработанный АПК внедрен и прошел широкую апробацию в различных организациях. Результаты многочисленных расчетных исследований показали, что разработанный программный комплекс позволяет эффективно и с достаточной точностью определить основные кинематические и интегральные гидравлические показатели лопастной гидромашины. Это дает возможность во многих случаях (особенно для малых ГЭС) заменить с помощью АПК физический эксперимент расчетом энергокавитационных показателей гидромашины и проводить оптимизацию элементов ее проточной части. В таблице и на рис. 4 приведены результаты расчетных исследований номенклатурных гидротурбин и дается сопоставление с данными их экспериментальных исследований.

Комплекс САПР центробежных насосов (САПР ЦН) создан под руководством А.А. Жарковского (рис. 5). Разработанные ранее методы расчета течения и потерь были предназначены в основном для гидротурбин, насос-турбин, насосов высокой быстротходности, т. е. для относительно широких проточных частей, для которых при расчете течения вязкой жидкости использовались методы теории плоского пограничного слоя. Для насосов низкой и средней бы-

Приведенные величины значений параметров оптимального режима РО и ПЛ гидротурбин различной быстротходности

Параметры, единицы измерения	Значения параметров для разных гидротурбин					
	РО15	РО45	РО75	РО115	РО170	ПЛ30
<i>Расчет</i>						
Q'_1 , л/с	1630	1250	1100	880	600	1150
n'_1 , об/мин	94	82	83	73	70	130
КПД, %	90,5	93,8	92,5	93,9	94,2	90,5
<i>Эксперимент</i>						
Q'_1 , л/с	1550	1210	1060	880	590	1110
n'_1 , об/мин	96	82,5	82,5	75	69	125
КПД, %	91,2	92,1	91,75	92,7	92,8	90

Угол установки лопасти рабочего колеса в градусах — $\varphi = 5^\circ$

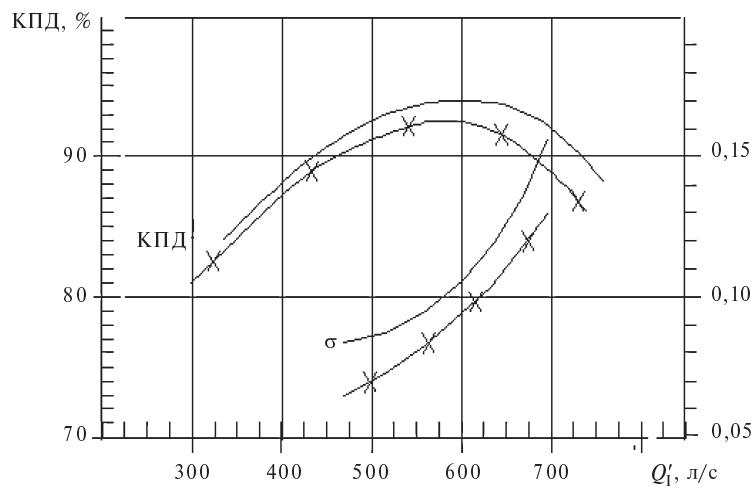


Рис. 4. Зависимости КПД и кавитационного коэффициента σ от приведенного расхода Q'_1 при постоянных приведенных оборотах ($n'_1 = 70$ об/мин) для гидротурбины РО170
 (— — расчет; $\times \times$ — эксперимент)

строходности были разработаны физическая и математическая модели течения с учетом сильных вторичных течений на ограничивающих дисках рабочего колеса, их несимметричности на лопастях, низкоэнергетической зоны у задней стороны лопасти на выходе из рабочего колеса. Модель расчета течения и потерь была апробирована с использованием имеющихся экспериментальных данных и хорошо зарекомендовала себя не только для рабочих колес, но и для отводов канального и спиральных типов. Была разработана методика, которая с доста-

точной для практики точностью позволяет прогнозировать характеристики ступеней центробежных насосов (рис. 6).

Для возможности организации процесса многовариантного проектирования проточной части ступени насоса в комплексе программ (см. рис. 6) предусмотрены подсистемы «Рабочее колесо», «Отвод», «Гидродинамика», «Графика».

Подсистема «Рабочее колесо» позволяет в автоматическом режиме выбрать основные параметры РК, спроектировать меридианное сечение, рассчитать равнокоростной или потенци-

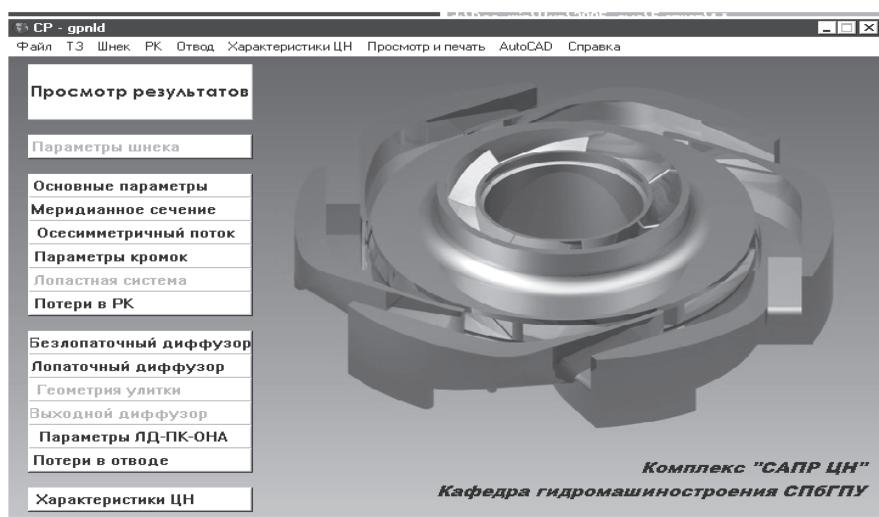


Рис. 5. Головное меню программы САПР ЦН

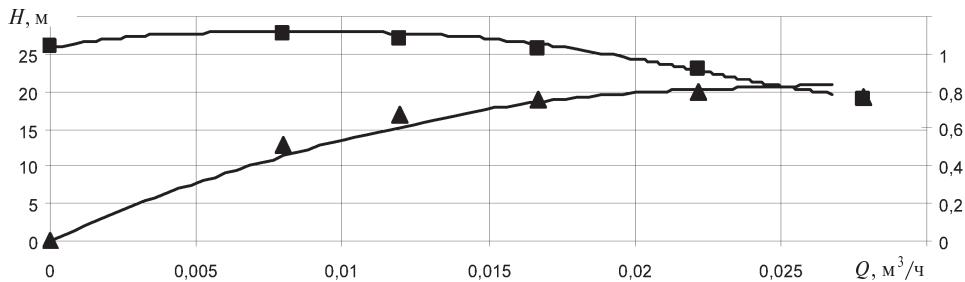


Рис. 6. Характеристика насоса 4К-18

альный поток, спрофилировать решетки лопастей на 3–5 поверхностях тока, выполнить расчеты течения невязкой и вязкой жидкости в приближении пространственного пограничного слоя и на их основе определить напор, потери и антикавитационные качества рабочего колеса. При проектировании лопасти возможно задание линейного, параболического или произвольного закона изменения относительной скорости $W(s)$ вдоль скелетной линии. Предусмотрена возможность задания цилиндрической лопасти одним радиусом и законом изменения угла лопасти $\beta_L(s)$. Толщина лопасти может быть задана постоянной либо изменяющейся по линейному или параболическому закону.

Подсистема «Отвод» позволяет выбрать основные параметры отводящих устройств, спрофилировать их и произвести оценку потерь в них. Подсистема проектирует: лопаточный диффузор, отвод канального типа (МКО), спиральный отвод (СО), выходной диффузор (ВД). Возможно проектирование спиральных отводов с круглым, трапециевидным поперечным сечением, свернутых набок по законам $V_u R = \text{const}$ или $V_{co} = \text{const}$. Проведенные тестовые расчеты подтвердили известное из эксперимента сильное

влияние относительного диаметра втулки на гидравлические потери в РК. Возможность расчетного определения влияния густоты решетки на потери в РК подтверждена с использованием имеющихся данных по РК с различными углами выхода. Программный комплекс позволяет определить оптимальные значения густоты решеток профилей осерадиального рабочего колеса при различном расположении входной кромки в меридианном сечении. Возможен расчет потерь в отдельных элементах проточной части (в рабочем колесе потери на дисках — 25–35 %, в низкоэнергетическом следе — 20–30 %, кромочные — 25–40 %), а также оптимальных значений коэффициента напора (он определяет диаметр рабочего колеса), распределения безразмерной относительной скорости вдоль средней линии лопасти, относительной ширины и числа лопастей рабочего колеса. Результаты проектирования визуализируются в диалоговом режиме на экране монитора. Чертежи проточных частей создаются с использованием программ на языке Visual-Lisp (рис. 7).

Комплекс работает под управлением программы-оболочки (см. рис. 5) на языке Delphi. Результаты расчетов хранятся в базе данных; он используется для проектирования проточных частей по заданиям промышленности. Комплекс внедрен в ряде организаций.

По курсу «Компьютерные технологии в науке и образовании» выполняются курсовая работа «Проектирование и прогнозирование характеристики ступени многоступенчатого насоса» (9-й семестр) с использованием комплекса программ САПР ЛС и курсовой проект «Проектирование и прогнозирование характеристики ступени консольного насоса» (10-й семестр) с использованием комплекса САПР ЦН. С использованием программных комплексов реализуется процесс



Рис. 7. Шнек постоянного шага

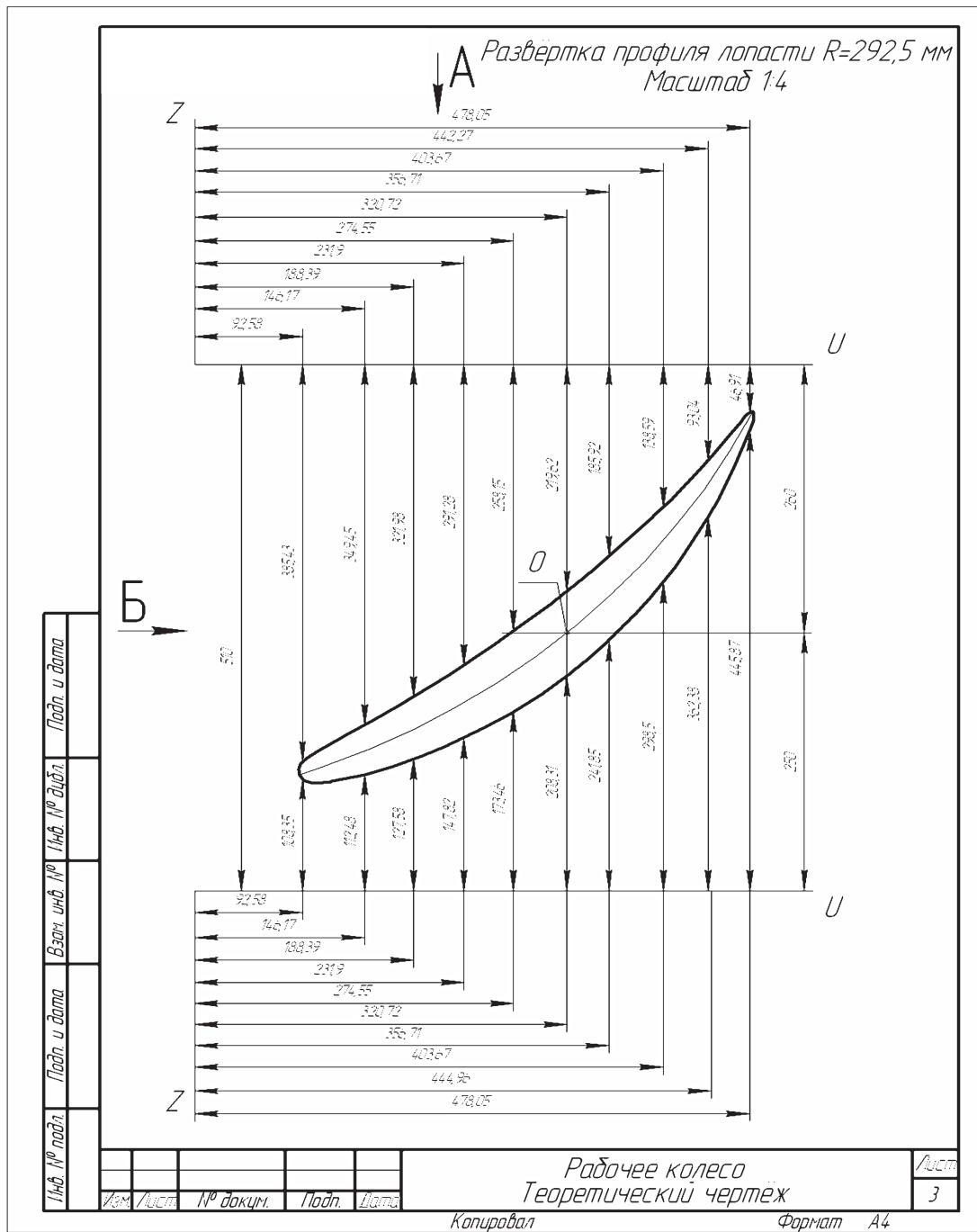


Рис. 8. Развертка профиля лопасти осевого насоса

многовариантного проектирования проточной части насоса, когда производится выбор, а затем оптимизация основных параметров ступени, проектируется меридианное сечение, лопастные системы РК, ЛД, ОНА, согласованные между собой и с минимальными гидравлическими потерями, прогнозируются характеристики ступени $H(Q)$, $\eta(Q)$, $C_{kp}(Q)$. Выполняется построение теоретических чертежей элементов проточной части и сборочного чертежа ступени в редакторах АВТОКАД или КОМПАС.

Комплекс программ «Расчет осевого насоса» разработан В.А. Голиковым. Для решения обратной гидродинамической задачи по расчету геометрических характеристик лопасти РК и лопатки выпрямляющего аппарата (ВА) используется программа «DONWIN», позволяющая в диалоговом режиме рассчитывать лопастные системы осевого насоса с возможностью анализа геометрических характеристик. Алгоритм программы реализует метод Вознесенского — Пекина с автоматическим определением функции формы, угловворота и кривизны «эквивалентной» дужки в 3–10 цилиндрических расчетных сечениях с возможностью дальнейших приближений в диалоговом режиме до получения плавных и монотонных геометрических характеристик.

По полученным результатам в редакторе АВТОКАД выполняется теоретический чертеж лопасти (рис. 8).

Для решения прямой гидродинамической задачи используется программа расчета обтекания «ROBON», позволяющая получить эпюры распределения относительных скоростей обтекания и избыточных давлений по контуру профиля лопасти РК или лопатки ВА и подсчитать значение теоретического напора. Алгоритм построен на программе Б.С. Раухмана по расчету обтекания профиля на осесимметричных поверхностях тока в слое переменной толщины и дополнен решением геометрической задачи сечения лопасти осесимметричной поверхностью тока потенциального потока. При этом форма лопасти задается геометрическими характеристиками, полученными по программе «DONWIN». Расчеты, выполненные для различных режимов работы, позволяют прогнозировать теоретическую напорную характеристику и условия возникновения профильной и щелевой кавитации в РК. Комплекс программ используется при выполнении студентами курсовых работ и проектов по дисциплинам «Лопастные машины и гидродинамические передачи» и «Насосное оборудование ТЭС и АЭС».

УДК 624.15:536.3

Н.В. Наумов

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ УПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА ЗА ПРЕДЕЛАМИ ПЛОЩАДКИ НАГРУЖЕНИЯ

В промышленном и гражданском строительстве очень важно знать влияние сооружений друг на друга через их основания. При моделировании основания методом конечных элементов (МКЭ) обычно рассматриваемые их объемы под сооружениями — небольшие. Примеров расчета упругого полупространства нет.

Необходимо получить более полную картину распространения вертикальных и горизонтальных напряжений за пределами площадки нагрузления. В работе [3] установили, что под

площадкой нагрузления 200×200 м вертикальные и горизонтальные напряжения приближаются к нулю на глубине 600 м. Возникает вопрос: будут ли нулевыми вертикальные и горизонтальные напряжения на расстоянии трех размеров площадки нагрузления в горизонтальном направлении и как они будут меняться по глубине?

На примере нагрузления нескольких площадок нужно выяснить, какие суммарные напряжения появятся под одной из них.



Преобразование формул

Формулы горизонтальных и вертикальных напряжений представленные в работе [1], после изменения обозначений, как на рис. 1, будут иметь вид

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \int_{Y_1}^{Y_2} \int_{X_2}^{X_1} \frac{3PZ^3}{2\pi r^5} dx dy = \\ &= \frac{3P}{2\pi} \left[\frac{X_2 Y_2 Z}{3} \frac{X_2^2 + Y_2^2 + 2Z^2}{(X_2^2 + Z^2)(Y_2^2 + Z^2)\sqrt{X_2^2 + Y_2^2 + Z^2}} + \right. \\ &\quad + \frac{1}{3} \operatorname{arctg} \frac{X_2 Y_2}{Z \sqrt{X_2^2 + Y_2^2 + Z^2}} - \\ &\quad - \frac{X_1 Y_2 Z}{3} \frac{X_2^2 + Y_1^2 + 2Z^2}{(X_2^2 + Z^2)(Y_1^2 + Z^2)\sqrt{X_2^2 + Y_1^2 + Z^2}} - \\ &\quad - \frac{1}{3} \operatorname{arctg} \frac{X_2 Y_1}{Z \sqrt{X_2^2 + Y_1^2 + Z^2}} - \\ &\quad - \frac{X_1 Y_2 Z}{3} \frac{X_1^2 + Y_2^2 + 2Z^2}{(X_1^2 + Z^2)(Y_2^2 + Z^2)\sqrt{X_1^2 + Y_2^2 + Z^2}} - \\ &\quad \left. - \frac{1}{3} \operatorname{arctg} \frac{X_1 Y_2}{Z \sqrt{X_1^2 + Y_2^2 + Z^2}} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{X_1 Y_1 Z}{3} \frac{X_1^2 + Y_1^2 + 2Z^2}{(X_1^2 + Z^2)(Y_1^2 + Z^2)\sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z^2}} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{3} \operatorname{arctg} \frac{X_1 Y_1}{Z \sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z^2}} \right];\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{P}{2\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{X_2 Y_2}{Z \sqrt{X_2^2 + Y_2^2 + Z^2}} - \right. \\ &\quad - \operatorname{arctg} \frac{X_2 Y_1}{Z \sqrt{X_2^2 + Y_1^2 + Z^2}} - \operatorname{arctg} \frac{X_1 Y_2}{Z \sqrt{X_1^2 + Y_2^2 + Z^2}} + \\ &\quad + \operatorname{arctg} \frac{X_1 Y_1}{Z \sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z^2}} -\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&\quad - \frac{X_2 Y_2 Z}{(X_2^2 + Z^2)\sqrt{X_2^2 + Y_2^2 + Z^2}} + \\ &\quad + \frac{X_2 Y_1 Z}{(X_2^2 + Z^2)\sqrt{X_2^2 + Y_1^2 + Z^2}} + \\ &\quad + \frac{X_1 Y_2 Z}{(X_1^2 + Z^2)\sqrt{X_1^2 + Y_2^2 + Z^2}} - \\ &\quad - \frac{X_1 Y_1 Z}{(X_1^2 + Z^2)\sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z^2}} - \\ &\quad - (1 - \mu^2) \left[- \operatorname{arctg} \frac{X_2}{Y_2} + \operatorname{arctg} \frac{X_1}{Y_2} + \operatorname{arctg} \frac{X_2}{Y_1} - \operatorname{arctg} \frac{X_1}{Y_1} - \right. \\ &\quad \left. - \left(\operatorname{arctg} \frac{X_2 Z}{Y_2 \sqrt{X_2^2 + Y_2^2 + Z^2}} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \operatorname{arctg} \frac{X_1 Z}{Y_2 \sqrt{X_1^2 + Y_2^2 + Z^2}} - \operatorname{arctg} \frac{X_2 Z}{Y_1 \sqrt{X_2^2 + Y_1^2 + Z^2}} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \operatorname{arctg} \frac{X_1 Z}{Y_1 \sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z^2}} \right) \right];\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_y &= \frac{P}{2\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{X_2 Y_2}{Z \sqrt{X_2^2 + Y_2^2 + Z^2}} - \right. \\ &\quad \left. \operatorname{arctg} \frac{X_1 Y_2}{Z \sqrt{X_1^2 + Y_2^2 + Z^2}} - \operatorname{arctg} \frac{X_2 Y_1}{Z \sqrt{X_2^2 + Y_1^2 + Z^2}} + \right. \\ &\quad \left. + \operatorname{arctg} \frac{X_1 Y_1}{Z \sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z^2}} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{X_2 Y_2 Z}{(X_2^2 + Z^2)\sqrt{X_2^2 + Y_2^2 + Z^2}} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{X_2 Y_1 Z}{(X_2^2 + Z^2)\sqrt{X_2^2 + Y_1^2 + Z^2}} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{X_1 Y_2 Z}{(X_1^2 + Z^2)\sqrt{X_1^2 + Y_2^2 + Z^2}} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{X_1 Y_1 Z}{(X_1^2 + Z^2)\sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z^2}} \right]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{X_1 Y_1 Z}{(X_1^2 + Z^2) \sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z^2}} - (1 - 2\mu) \times \\
 & \times \left[-\operatorname{arctg} \frac{Y_2}{X_2} + \operatorname{arctg} \frac{Y_1}{X_2} + \operatorname{arctg} \frac{Y_2}{X_1} - \operatorname{arctg} \frac{Y_1}{X_1} - \right. \\
 & - \left(\operatorname{arctg} \frac{Y_2 Z}{X_2 \sqrt{X_2^2 + Y_2^2 + Z^2}} - \right. \\
 & - \operatorname{arctg} \frac{Z Y_1}{X_2 \sqrt{X_2^2 + Y_1^2 + Z^2}} - \\
 & - \operatorname{arctg} \frac{Z Y_2}{X_1 \sqrt{X_1^2 + Y_2^2 + Z^2}} + \\
 & \left. \left. + \operatorname{arctg} \frac{Z Y_1}{X_1 \sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z^2}} \right) \right] \times \\
 & - \operatorname{arctg} \left[-\frac{(a-x)(b+y)}{Z \sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2 + Z^2}} \right] + \\
 & + Z(a+x)(b-y) \times \\
 & \times \frac{(a+x)^2 + (b-y)^2 + 2Z^2}{((a+x)^2 + Z^2) [(b-y)^2 + Z^2] \sqrt{(a+x)^2 + (b-y^2) + Z^2}} - \\
 & - \operatorname{arctg} \left[-\frac{(a+x)(b-y)}{Z \sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2 + Z^2}} \right] + \\
 & + Z(a+x)(b+y) \times \\
 & \times \frac{(a+x)^2 + (b+y)^2 + 2Z^2}{((a+x)^2 + Z^2) [(b+y)^2 + Z^2] \sqrt{(a+x)^2 + (b+y^2) + Z^2}} + \\
 & + \operatorname{arctg} \left[\frac{(a+x)(b+y)}{Z \sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2 + Z^2}} \right].
 \end{aligned}$$

Для того чтобы упростить расчет по формулам, представленным выше, выразим X_2, X_1, Y_2, Y_1 через координаты x и y :

$$X_2 = (a-x); \quad X_1 = -(a+x);$$

$$Y_2 = (b-y); \quad Y_1 = -(b+y).$$

Тогда

$$\begin{aligned}
 \sigma_z &= \int_{Y_1}^{Y_2} \int_{X_2}^{X_1} \frac{3Pz^3}{2\pi r^5} dx dy = \\
 &= \frac{P}{2\pi} \left[Z(a-x)(b-y) \times \right. \\
 &\times \frac{(a-x)^2 + (b-y)^2 + 2Z^2}{((a-x)^2 + Z^2) [(b-y)^2 + Z^2] \sqrt{(a-x)^2 + (b-y^2) + Z^2}} + \\
 &+ \operatorname{arctg} \frac{(a-x)(b-y)}{Z \sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2 + Z^2}} + \\
 &+ Z(a-x)(b+y) \times \\
 &\times \frac{(a-x)^2 + (b+y)^2 + 2Z^2}{((a-x)^2 + Z^2) [(b+y)^2 + Z^2] \sqrt{(a-x)^2 + (b+y^2) + Z^2}} -
 \end{aligned}$$

Полученная формула σ_z после небольших преобразований совпадает с исправленной зависимостью Короткина [2]:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= \frac{P}{2\pi} \times \\
 &\times \left[\operatorname{arctg} \frac{(a-x)(b-y)}{Z \sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2 + Z^2}} - \right. \\
 &- \operatorname{arctg} \left[-\frac{(a-x)(b+y)}{Z \sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2 + Z^2}} \right] - \\
 &- \operatorname{arctg} \left[-\frac{(a+x)(b-y)}{Z \sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2 + Z^2}} \right] + \\
 &+ \operatorname{arctg} \frac{(a+x)(b+y)}{Z \sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2 + Z^2}} -
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 & -\frac{(a-x)(b-y)Z}{[(a-x)^2 + Z^2]\sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2 + Z^2}} - \\
 & -\frac{(a-x)(b+y)Z}{[(a-x)^2 + Z^2]\sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2 + Z^2}} - \\
 & -\frac{(a+x)(b-y)Z}{[(a+x)^2 + Z^2]\sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2 + Z^2}} - \\
 & -\frac{(a+x)(b+y)Z}{[(a+x)^2 + Z^2]\sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2 + Z^2}} - \\
 & -(1-\mu^2) \left[-\operatorname{arctg} \frac{(a-x)}{(b-y)} + \operatorname{arctg} \left[-\frac{(a+x)}{(b-y)} \right] + \right. \\
 & \quad \left. + \operatorname{arctg} \left[-\frac{(a-x)}{(b+y)} \right] - \operatorname{arctg} \frac{(a+x)}{(b+y)} - \right. \\
 & -\left\{ \operatorname{arctg} \frac{(a-x)Z}{(b-y)\sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2 + Z^2}} - \right. \\
 & \quad \left. -\operatorname{arctg} \left[-\frac{(a+x)Z}{(b-y)\sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2 + Z^2}} \right] - \right. \\
 & \quad \left. -\operatorname{arctg} \left[-\frac{(a-x)Z}{(b+y)\sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2 + Z^2}} \right] + \right. \\
 & \quad \left. + \operatorname{arctg} \frac{(a+x)Z}{(b+y)\sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2 + Z^2}} \right] ; \\
 \sigma_y = & \frac{P}{2\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{(a-x)(b-y)}{Z\sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2 + Z^2}} - \right. \\
 & \quad \left. -\operatorname{arctg} \left[-\frac{(a+x)(b-y)}{Z\sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2 + Z^2}} \right] - \right. \\
 & \quad \left. -\operatorname{arctg} \left[-\frac{(a-y)Z}{(a+x)\sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2 + Z^2}} \right] + \right. \\
 & \quad \left. + \operatorname{arctg} \frac{(b+y)Z}{(a+x)\sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2 + Z^2}} \right] ;
 \end{aligned}$$

$$\tau_{xy} = \frac{P}{2\pi} \left[Z \left(\frac{1}{\sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2 + Z^2}} - \frac{1}{\sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2 + Z^2}} - \frac{1}{\sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2 + Z^2}} + \frac{1}{\sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2 + Z^2}} \right) - (1-2\mu) \times \right.$$

$$\times \ln \left[\frac{\left(\sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2 + Z^2} + Z \right) \left(\sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2 + Z^2} + Z \right)}{\left(\sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2 + Z^2} + Z \right) \left(\sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2 + Z^2} + Z \right)} \times \right.$$

$$\left. \times \frac{\left[(a-x)^2 + (b-y)^2 \right] \left[(a+x)^2 + (b+y)^2 \right]}{\left[(a-x)^2 + (b+y)^2 \right] \left[(a+x)^2 + (b-y)^2 \right]} \right];$$

$$\tau_{yz} = \frac{PZ^2}{2\pi} \times$$

$$\times \left[(a-x) \left(\frac{1}{\left[(b-y)^2 + Z^2 \right] \sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2 + Z^2}} - \frac{1}{\left[(b+y)^2 + Z^2 \right] \sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2 + Z^2}} \right) + \right.$$

$$+ (a+x) \left(\frac{1}{\left[(b-y)^2 + Z^2 \right] \sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2 + Z^2}} - \frac{1}{\left[(b+y)^2 + Z^2 \right] \sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2 + Z^2}} \right);$$

$$\tau_{zx} = \frac{PZ^2}{2\pi} \times$$

$$\times \left[(b-y) \left(\frac{1}{\left[(a-x)^2 + Z^2 \right] \sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2 + Z^2}} - \frac{1}{\left[(a+x)^2 + Z^2 \right] \sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2 + Z^2}} \right) + \right.$$

$$+ (b+y) \left(\frac{1}{\left[(a-x)^2 + Z^2 \right] \sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2 + Z^2}} - \frac{1}{\left[(a+x)^2 + Z^2 \right] \sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2 + Z^2}} \right);$$

Расчет напряжений

за пределами площадки нагружения

Произведем расчет напряжений основания от площадки, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой 20 т/m^2 , со сторонами $2a = 200 \text{ м}$, $2b = 200 \text{ м}$, (см. рис 1) при коэффициенте Пуассона $0,2$. Координаты x , м, прямых, параллельных оси Z и лежащих в плоскости XOZ , следующие: $x_1 = -100,01$, $x_2 = -210$, $x_3 = -250$, $x_4 = -300$, $x_5 = -400$, $x_6 = -500$, $x_7 = -600$, и $x_8 = -700$, $y = 0$. Расчет напряжений будет производиться на этих прямых, при этом изменяться будут только координаты z . Координата глубины в расчетах определялась таким образом, чтобы на графике были нулевые и максимальные значения напряжений. На графиках: $Zz = \sigma_z$, $Xx = \sigma_x$, $Yy = \sigma_y$.

Как следует из табл. 1, при движении расчетной точки по прямой, параллельной оси z с координатами $x_1 = -100,01 \text{ м}$ и $y = 0$, на поверхности наблюдаются максимальные горизонтальные растягивающие напряжения σ_x . Даже при небольшом изменении координаты z напряжение переходит через нулевую точку и становится сжимающим. На участке $[z = -0,0036 \text{ м}, -z = -285 \text{ м}]$ σ_x принимает максимальное значение сжимающих напряжений, равное $-5,59 \text{ т/m}^2$. При $z = -285 \text{ м}$



σ_x принимает нулевое значение; далее примерно до глубины 500 м происходит небольшое увеличение растягивающих напряжений. С дальнейшим увеличением z напряжения приближаются к нулю.

Напряжения σ_y при движении расчетной точки вглубь полупространства, также как и σ_x , меняются по волнобразно гаснущей кривой. Первоначально с увеличением глубины происходит рост сжимающих напряжений до точки $z = -0,5$ м, где $\sigma_y^{\max} = -7,85 \text{ т/м}^2$, далее они уменьшаются, принимают нулевое значение при $z = -90,4$ м. Дальнейшее увеличение глубины приводит к росту растягивающих напряжений:

$\sigma_y^{\max} = 0,51 \text{ т/м}^2$ при $z = -150$ м. При больших глубинах напряжения приближаются к нулю.

Вертикальные сжимающие напряжения увеличиваются до точки $z = -10$ м, где $\sigma_z^{\max} = -9,99 \text{ т/м}^2$, дальнейшее увеличение глубины приближает величины напряжений к нулю.

При радиальном удалении расчетной точки от центра площадки нагружения происходит плавное уменьшение вертикальных и горизон-

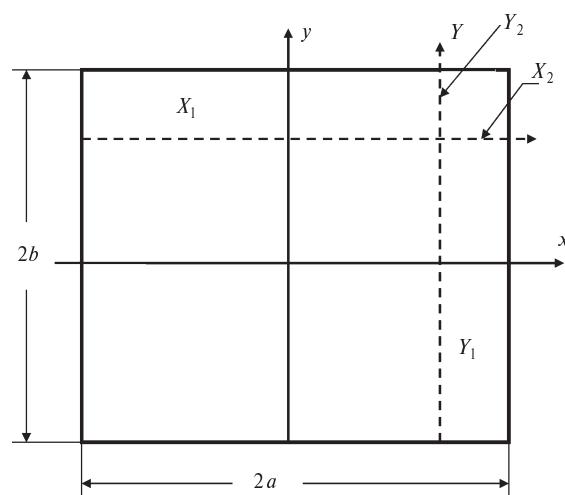


Рис. 1. Площадка нагружения

тальных напряжений за пределами площадки нагружения (см. таблицы расчетов).

Чтобы представить глобальную картину изменения вертикальных и горизонтальных напряжений, необходимо построить линию нулевых напряжений и обозначить зоны растяжений и сжатий.

В плоскости ZOX на расстоянии 0,01 м от площадки нагружения вырежем участок размером 600×600 м и на нем обозначим зоны растяжения

Таблица 1

Расчет напряжений σ_z , σ_x , σ_y и просадки z на разных расстояниях от центра площадки

№ точки	σ_z	σ_x	σ_y	Z
a) на расстоянии 100,01 м от центра				
1	0,00	3,98	-4,12	-0,0001
2	-0,17	0,00	-4,95	-0,0036
3	-8,74	-5,59	-7,72	-0,1
4	-9,75	-5,57	-7,85	-0,5
5	-9,88	-5,55	-7,80	-1
6	-9,99	-5,10	-6,49	-10
7	-9,89	-4,14	-3,83	-30
8	-9,32	-2,89	-1,20	-60
9	-8,35	-1,90	0,00	-90,4
10	-6,25	-0,75	0,51	-150
11	-3,14	0,00	0,32	-285
12	-1,90	0,08	0,19	-400
13	-1,31	0,08	0,13	-500
14	-0,95	0,07	0,09	-600

Продолжение табл. 1

№ точки	σ_z	σ_x	σ_y	Z
<i>б) на расстоянии 110 м от центра</i>				
1	0	3,80	-3,80	-0,0001
2	0	3,68	-3,81	-0,1
3	0,00	2,63	-3,91	-1
4	-0,16	0,00	-4,14	-3,48
5	-1,81	-3,62	-4,33	-10
6	-5,95	-4,26	-2,96	-30
7	-7,31	-3,08	-0,85	-60
8	-7,11	-2,09	0,15	-90
9	-6,91	-1,83	0,31	-100
10	-4,48	-0,38	0,48	-200
11	-2,81	-0,02	0,30	-300
12	-1,85	0,06	0,19	-400
13	-1,29	0,07	0,13	-500
14	-0,94	0,06	0,09	-600
<i>в) на расстоянии 150 м от центра</i>				
1	0	2,69	-2,69	-0,0001
2	0,00	1,75	-2,40	-5,0
3	-0,10	0,00	-1,80	-15,2
4	-1,84	-2,67	0,00	-55
5	-3,29	-2,11	0,68	-100
6	-3,20	-0,68	0,53	-200
7	-2,31	-0,17	0,31	-300
8	-1,63	-0,02	0,20	-400
9	-1,18	0,03	0,13	-500
10	-0,88	0,04	0,09	-600
<i>г) на расстоянии 200 м от центра</i>				
1	0	1,72	-1,72	-0,0001
2	0,00	1,71	-1,71	-0,1
3	0,00	1,04	-1,21	-10
4	-0,06	0,00	-0,43	-27
5	-0,15	-0,57	0,00	-38,7
6	-0,29	-0,99	0,32	-50
7	-1,13	-1,60	0,83	-100
8	-1,89	-0,86	0,55	-200
9	-1,69	-0,33	0,31	-300
10	-1,33	-0,11	0,20	-400
11	-1,02	-0,03	0,13	-500
12	-0,79	0,01	0,09	-600

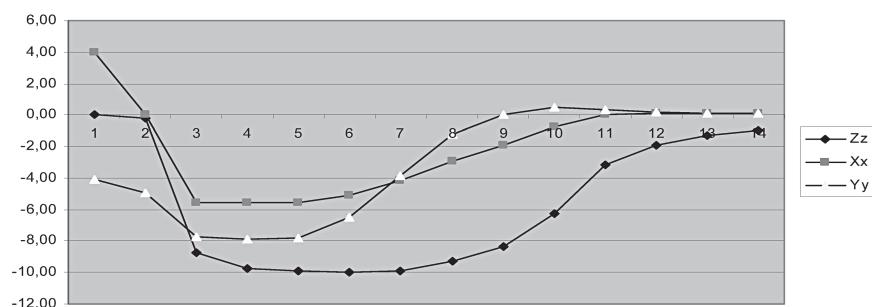
Продолжение табл. 1

№ точки	σ_z	σ_x	σ_y	Z
д) на расстоянии 300 м от центра				
1	0	0,81	-0,81	-0,0001
2	0,00	0,81	-0,81	-0,1
3	0,00	0,165	-0,11	-28,0
4	-0,01	0,30	0,00	-28,8
5	-0,02	0,00	0,38	-47,5
6	-0,17	-0,56	0,73	-100
7	-0,59	-0,69	0,50	-200
8	-0,80	-0,44	0,30	-300
9	-0,79	-0,23	0,19	-400
10	-0,71	-0,12	0,13	-500
11	-0,60	-0,06	0,09	-600
е) на расстоянии 400 м от центра				
1	0	0,46	-0,46	-0,0001
2	0	0,45	-0,44	-1
3	0	0,39	-0,25	-10
4	0,00	0,29	0,00	-23,3
5	-0,01	0,00	0,51	-66,5
6	-0,04	-0,17	0,60	-100
7	-0,20	-0,41	0,43	-200
8	-0,36	-0,37	0,27	-300
9	-0,44	-0,26	0,17	-400
10	-0,45	-0,16	0,12	-500
11	-0,42	-0,10	0,09	-600
ж) на расстоянии 500 м от центра				
1	0	0,30	-0,30	-0,0001
2	0,00	0,30	-0,29	-0,1
3	0,00	0,26	-0,14	-10
4	0,00	0,22	0,00	-19,7
5	-0,01	0,00	0,49	-86,5
6	-0,08	-0,23	0,37	-200
7	-0,16	-0,27	0,24	-300
8	-0,24	-0,23	0,16	-400
9	-0,28	-0,17	0,11	-500
10	-0,29	-0,12	0,08	-600
з) на расстоянии 600 м от центра				
1	0	0,21	-0,21	-0,0001
2	0	0,18	-0,08	-10
3	0	0,17	0,00	-17

Окончание табл. 1

№ точки	σ_z	σ_x	σ_y	Z
4	-0,01	0,01	0,43	-100
5	-0,03	-0,13	0,32	-200
6	-0,08	-0,18	0,21	-300
7	-0,13	-0,18	0,15	-400
8	-0,17	-0,15	0,10	-500
9	-0,19	-0,12	0,08	-600
<i>и) на расстоянии 700 м от центра</i>				
1	0	0,15	-0,15	-0,0001
2	0	0,14	-0,05	-10
3	0	0,13	0,00	-15
4	0,00	0,00	0,37	-120
5	-0,02	-0,07	0,28	-200
6	-0,04	-0,12	0,19	-300
7	-0,07	-0,14	0,13	-400
8	-0,10	-0,13	0,10	-500
9	-0,13	-0,11	0,07	-600

a)



б)

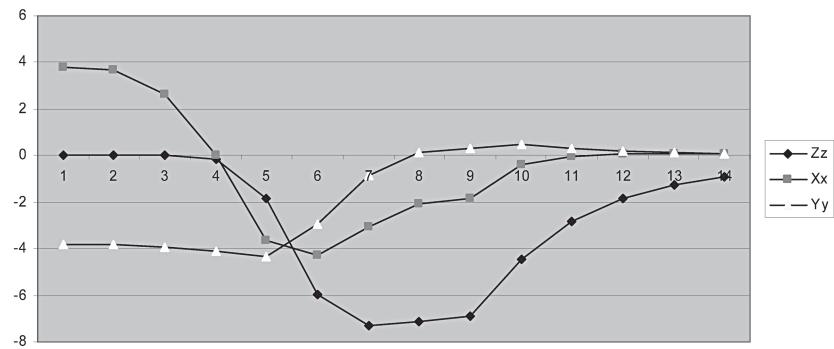


Рис. 2 (начало). Напряжения σ_x , σ_y , σ_z на разных расстояниях, м, от центра площадки: 110,01 (а), 110 (б)

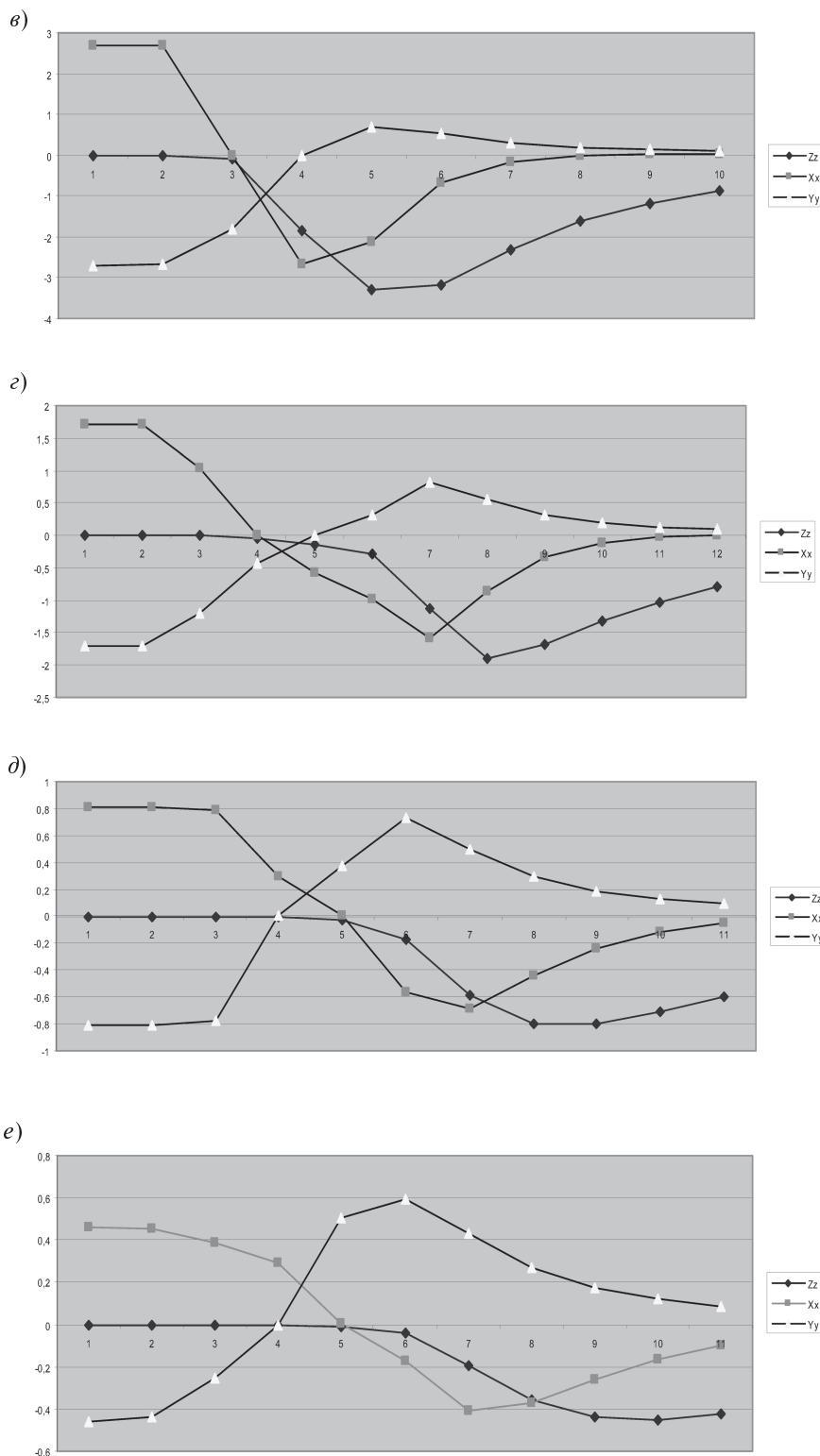


Рис. 2 (продолжение). Напряжения σ_x , σ_y , σ_z на разных расстояниях, м, от центра площадки: 150 (*в*), 200 (*с*), 300 (*д*), 400 (*е*)

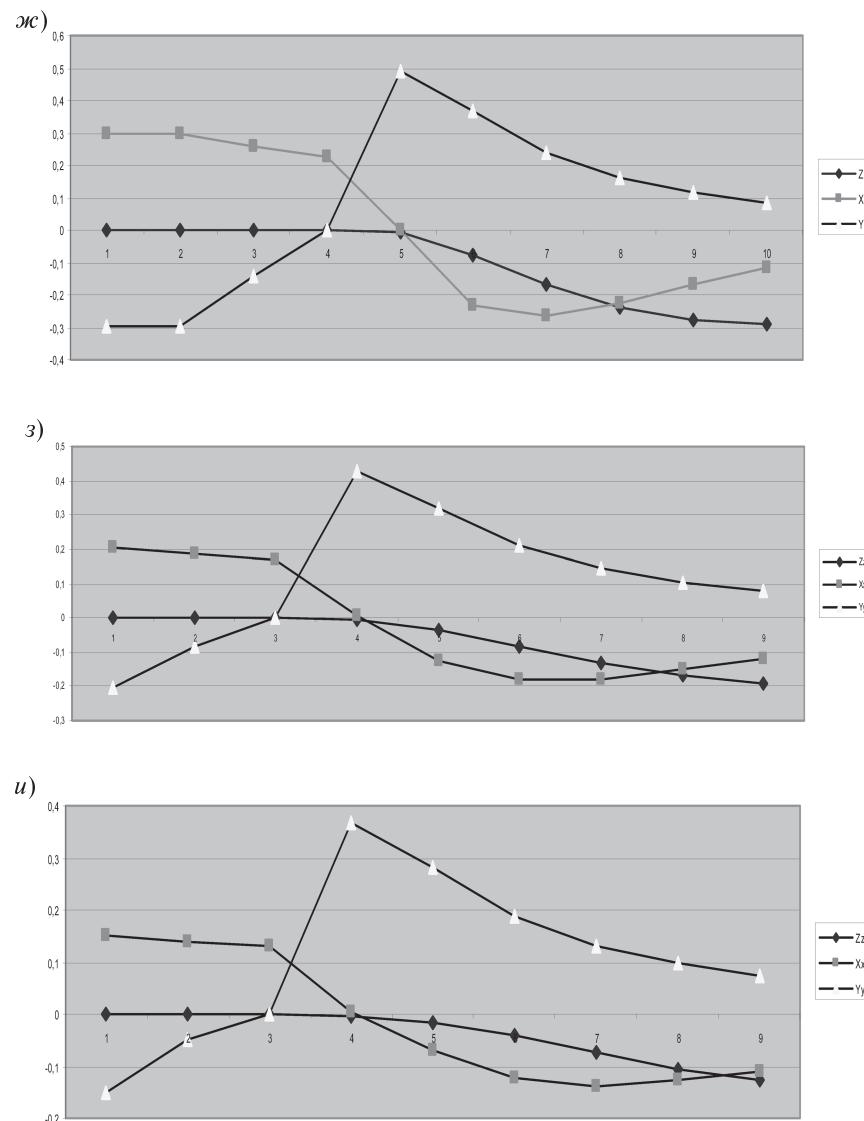


Рис. 2 (окончание). Напряжения σ_x , σ_y , σ_z на разных расстояниях, м, от центра площадки: 500 (жс), 600 (з) и 700 (и)

и сжатия σ_x . Рис. 3 построен на основании представленных выше расчетов. На нем видно, как зона растяжения у поверхности по мере удаления расчетной точки от площадки нагружения расширяется. Из таблицы расчетов видим: чем дальше точки расчета от площадки нагружения, тем меньше напряжения. Зона сжатия занимает большую часть участка, находится между двумя нулевыми линиями 1 и 2.

Зона сжатия σ_y у поверхности, отделенная линией 1 на рис. 4, уменьшается по мере удаления от площадки нагружения. Участок плоско-

сти разделен на две участка, большую часть занимает зона растягивающих напряжений.

На рис. 5 выше линии 1 напряжения σ_z нулевые, а ниже — сжимающие. Для любой формы площадки нагружения горизонтальные и вертикальные напряжения приближаются к нулевым значениям, подобно затухающей волне переходя от зоны растяжения к зонам сжатия или наоборот. Напряжения под площадкой нагружения и за ее пределами приближаются к нулевым значениям примерно на одинаковых глубинах и расстояниях от площадки.

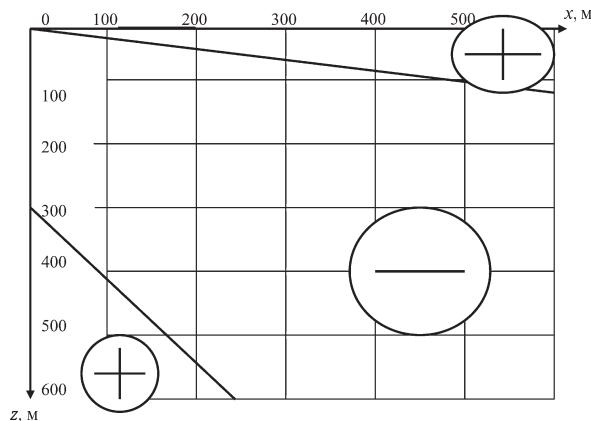


Рис. 3. Зоны растяжений и сжатий σ_x

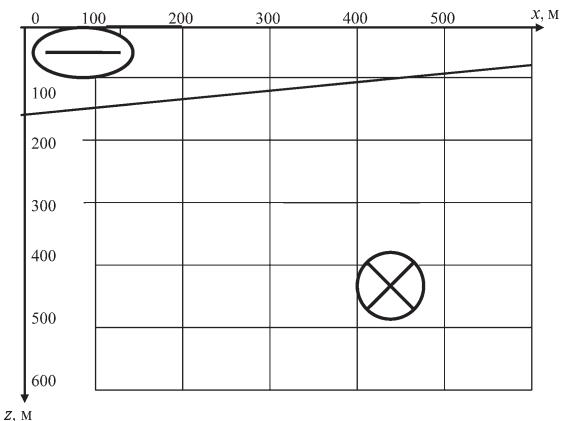


Рис. 4. Зоны сжатий и растяжений σ_y

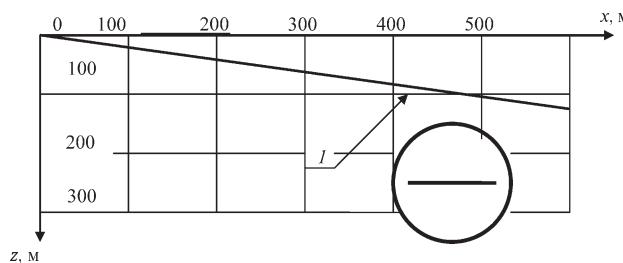


Рис. 5. Зоны напряжений σ_z

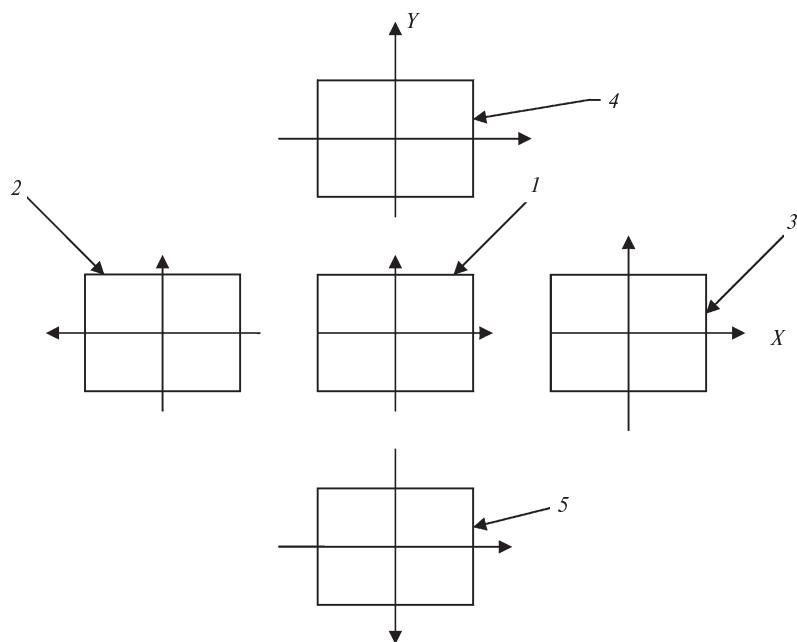


Рис. 6. План расположения площадок нагружения

Расчет напряжений от нескольких площадок нагружения

Рассмотрим пять площадок 200×200 м, нагруженных равномерно распределенной нагрузкой 20 т/м^2 , которые находятся на расстоянии 50 м, а стороны параллельны (рис. 6).

Определим в центре под площадкой 1 на разных глубинах напряжения от нагружения полу-пространства пятью площадками нагружения. По условиям решения задачи [1] оси x и y площадок нагружения 2, 3, 4 и 5 должны быть направлены в сторону от площадки 1. По данным табл. 2 расчета напряжений под площадкой 1

можно заметить следующую закономерность. Шахматное расположение площадок нагружения на полупространстве практически не изменяет горизонтальных напряжений под площадкой 1 до глубины 20 м. Площадки нагружения 2 и 3 вызывают растягивающие напряжения σ_x , а площадки 4 и 5 — сжимающие. Эффект взаимной нейтрализации горизонтальных напряжений наблюдается и для напряжений σ_y . Суммарные вертикальные напряжения с возрастанием глубины увеличиваются. Так на глубине 150 м σ_z первой площадки увеличивается на 28,4 %, из-за действия нагрузки на других площадках.

Таблица 2

Напряжения в центре под площадкой 1 на разных глубинах

Номер площадки	Z	x	y	σ_z	σ_x	σ_y
1	-0,1	0,0	0,0	-20,010	-13,554	-13,554
2	-0,1	-250	0,0	0,000	1,144	-1,143
3	-0,1	-250	0,0	0,000	1,144	-1,143
4	-0,1	0,0	-250	0,000	-1,146	1,144
5	-0,1	0,0	-250	0,000	-1,146	1,144
Σ				-20,010	-13,559	-13,551
1	-10	0,0	0,0	-19,995	-11,496	-11,496
2	-10	-250	0,0	-0,001	0,821	-0,761
3	-10	-250	0,0	-0,001	0,821	-0,761
4	-10	0,0	-250	-0,001	-1,059	0,878
5	-10	0,0	-250	-0,001	-1,059	0,878
Σ				-19,998	-11,972	-11,260
1	-20	0,0	0,0	-19,896	-9,508	-9,508
2	-20	-250	0,0	-0,006	0,505	-0,397
3	-20	-250	0,0	-0,006	0,505	-0,397
4	-20	0,0	-250	-0,006	-0,972	0,617
5	-20	0,0	-250	-0,006	-0,972	0,617
Σ				-19,919	-10,442	-9,067
1	-35	0,0	0,0	-19,456	-6,857	-6,857
2	-35	-250	0,0	-0,029	0,070	0,068
3	-35	-250	0,0	-0,029	0,070	0,068
4	-35	0,0	-250	-0,029	-0,845	0,255
5	-35	0,0	-250	-0,029	-0,845	0,255
Σ				-19,573	-8,408	-6,212
1	-50	0,0	0,0	-18,607	-4,721	-4,721
2	-50	-250	0,0	-0,078	-0,300	0,410
3	-50	-250	0,0	-0,078	-0,300	0,410

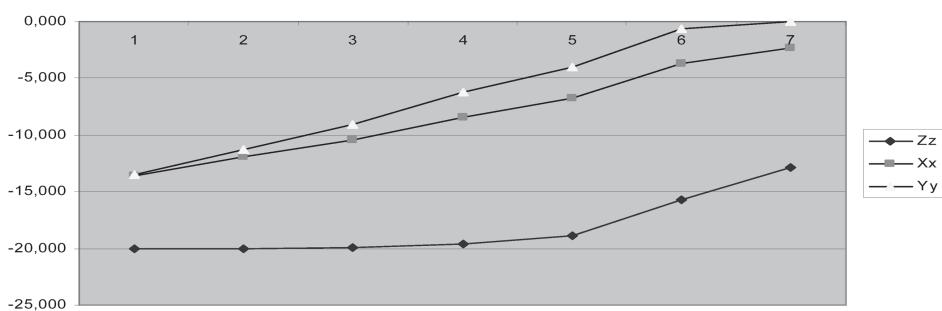
Окончание табл. 2

Номер площадки	Z	x	y	σ_z	σ_x	σ_y
4	-50	0,0	-250	-0,078	-0,724	-0,057
5	-50	0,0	-250	-0,078	-0,724	-0,057
Σ				-18,920	-6,769	-4,016
1	-100	0,0	0,0	-14,025	-0,961	-0,961
2	-100	-250	0,0	-0,411	-0,974	0,804
3	-100	-250	0,0	-0,411	-0,974	0,804
4	-100	0,0	-250	-0,411	-0,385	-0,661
5	-100	0,0	-250	-0,411	-0,385	-0,661
Σ				-15,668	-3,679	-0,674
1	-150	0,0	0,0	-9,688	0,061	0,061
2	-150	-250	0,0	-0,801	-1,018	0,700
3	-150	-250	0,0	-0,801	-1,018	0,700
4	-150	0,0	-250	-0,801	-0,160	-0,752
5	-150	0,0	-250	-0,801	-0,160	-0,752
Σ				-15,668	-3,679	-0,044

Таблица 3

**Суммарные напряжения σ_z , σ_x , σ_y в центре площадки 1
на разных глубинах**

z	σ_z	σ_x	σ_y
-0,1	-20,010	-13,559	-13,551
-10	-19,998	-11,972	-11,260
-20	-19,919	-10,442	-9,067
-35	-19,573	-8,408	-6,212
-50	-18,920	-6,769	-4,016
-100	-15,668	-3,679	-0,674
-150	-12,894	-2,295	-0,044


 Рис. 7. Суммарные напряжения σ_x , σ_y , σ_z в центре площадки 1
на разных глубинах в случае пяти площадок нагружения (см. рис. 6 и табл. 3)

Однако, если площадки нагружения 4 и 5 убрать, то ситуация ухудшается. Работа основания под площадкой 1 становится несимметричной. Суммарное напряжение σ_x уменьшается, а σ_y увеличивается.

Заключение

Теорема. При любой форме и размерах площадки нагружения упругого полупространства

горизонтальные напряжения при движении расчетной точки в глубину полупространства гаснут по волнобразной кривой.

Теорема. При шахматном расположении площадок нагружения суммарные горизонтальные напряжения от действия нагрузки на внешних площадках на небольших глубинах под центральной площадкой приближаются к нулевым значениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Наумов И.В.** Определение напряженно-деформированного состояния упругого полупространства от произвольной нагрузки [Текст]: Дисс. ... канд. техн. наук. / И. В. Наумов.— СПб., 2009.— 122 с.
2. **Флорин, В.А.** Основы механики грунтов

[Текст] / В.А. Флорин.— М., 1959.

3. **Наумов, И.В.** Особенности напряженного состояния упругого полупространства при нормальном нагружении [Текст] / И.В. Наумов // Научно-техн. ведомости СПбГПУ.— 2011. № 1(117).— С. 278–286.

УДК 665.3:541/69

*Б.И. Иголкин, А.Г. Воловей, В.С. Мехтиев,
В.В. Василов, К.Ю. Ребане*

ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТАДИИ РАФИНАЦИИ

Современное производство растительных масел должно обеспечивать получение продуктов с высокими потребительскими свойствами при сохранении высоких экономических и эргономических показателей. Одна из составляющих этой задачи — создание эффективного контроля изменения состояния (качества) продукта по отдельным стадиям рафинации масла. При этом желательна непрерывность, оперативность и дистанционность осуществления контроля, позволяющего с высокой чувствительностью отслеживать влияние вариации исходного сырья, дозирование реагентов, извлечение нежелательных примесей при сохранении полезных для организма веществ, выбор технологических режимов (температура, давление, гидродинамика, и т. д.) и пр.

Выполнение этих требований в наиболее полном объеме можно ожидать при использовании электрофизических способов контроля измене-

ния состояния жидкого продукта [1]. В частности, представляет интерес контроль изменения состояния (качества) масла при его рафинации по величине изменения электропроводности в зависимости от частоты электромагнитных колебаний и температуры. К особенностям этого способа относят способность отслеживать изменение исходного (для данной стадии технологического процесса) физико-химического состояния (качества) продукта, обусловленного атомно-молекулярным составом основного компонента, строением молекул, общей структурой, а также наличием сопутствующих ингредиентов и вносимых реагентов. Целевое удаление какого-либо компонента, добавка необходимого реагента или иное изменение внутренней организации продукта на рассматриваемой стадии процесса с неизбежностью ведет к изменению внутреннего электромагнитного состояния продукта, что мгновенно отражается в отклике на



воздействие внешнего переменного электромагнитного поля. Данный отклик может быть зафиксирован по величине электрофизических показателей, в частности электропроводности и диэлектрической проницаемости. Измерение электропроводности при разных частотах электромагнитных колебаний и температурах, как показано в работе [2], дает наиболее объемную информацию об изменении качества продукта. Это должно способствовать большей оперативности такого способа контроля стадий рафинации по сравнению с традиционными, в основном химическими, методами, применяемыми раздельно по разным компонентам. Подчеркнем, что определение изменения электромагнитного состояния по величине электропроводности в конце (начале) каждой из операций процесса, проведенной в оптимальном технологическом режиме, обуславливает возможность сквозного контроля процесса, оперативного управления стадиями рафинации и получения конечного продукта требуемого качества. При этом очевидна возможность размещения малогабаритного чувствительного элемента (датчика) непосредственно в технологическом потоке, что способствует реализации задачи дистанционного управления качеством продукта.

Исследования изменения электромагнитного состояния растительных масел по стадиям рафинации проводились на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.

В рабочем объеме трехэлектродного датчика 3, помещенного с помощью стеклянного стакана 7, 8 в приспособление для терmostатирования (2) и согласованного коаксиальным кабелем с электронным блоком 5, 6, на масло воздействует электромагнитное (Э/м) поле с дискретно контролируемой частотой в диапазоне от 10 до 100 кГц. Температура масла при терmostатировании датчика внутри диапазона от 20 до 70 °С и выбранных граничных температурах поддерживалась с помощью терmostата LOIP LT-100 1 с точностью 0,5 °С. Дополнительно температура контролировалась ртутным термометром 4.

Для анализа использовались значения активной удельной электропроводности G_p (нСм/м), фиксируемые непосредственно с монитора электронного блока. Геометрическая постоянная датчика равна 0,947 1/м.

Объектом исследования были подсолнечные масла комбината ОАО «ЭФКО» на отдельных стадиях технологического процесса очистки (ра-

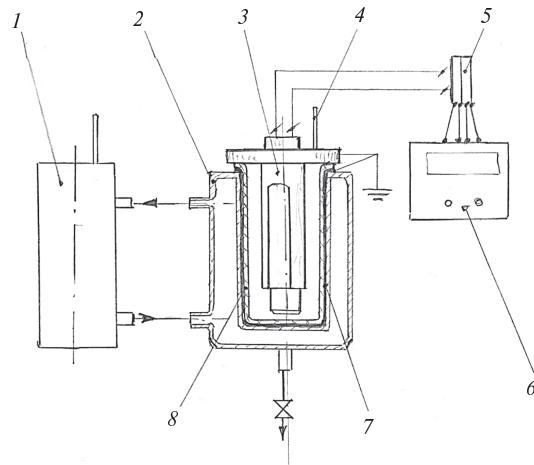


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

финации), а также масла, приобретенные в различной сети.

Ранее было показано, что частотно-температурные кривые всех исследованных растительных масел в координатах «активная электропроводность — частота электромагнитных колебаний» имеют точку пересечения, положение которой, а также характер самих кривых могут служить основой для дальнейшего развития способа, использующего обнаруженный эффект электропроводности жидкостей [2, 3]. Было подчеркнуто, что найденные по точке пересечения характеристические электропроводность (G_{px}) и частота электромагнитных колебаний (F_x), определяющие электромагнитное состояние конкретного вещества, при котором электропроводность жидкости не зависит от температуры, соответствуют только данному составу растительного масла.

В таблице приведены величины характеристической электропроводности и характеристической частоты некоторых из исследованных растительных масел. Как видно, каждое масло имеет вполне определенную величину характеристической электропроводности и характеристической частоты, что соответствует электромагнитному состоянию масла на указанной стадии процесса рафинации.

Более явно это демонстрирует рис. 2, где точки пересечения по отдельным стадиям рафинации и видам масел (данные табл. 1) представлены в координатах «характеристическая активная удельная электропроводность G_{px} , нСм/м — частота колебаний F_x , кГц». Отчетливо наблюдается геометрическая зависимость, отражающая связь

**Величины характеристической электропроводности
и характеристической частоты по стадиям рафинации подсолнечных масел**

Номер образца	Наименование масла	Стадия очистки	G_{px} , нСм/м	F_x , кГц
1	«Ставраполье» (р)	Нерафинированное, прессовое	3,4	33
2	«Золотая семечка» (р)	Рафинированное, дезодорированное	27,2	70
3	«Золотая семечка» (р)	Рафинированное, дезодорированное + + вода	9,7	52
4	«1016» (з)	Вымороженное	48	80
5	«616» (з)	Отбеленное	5,9	47
6	«816» (з)	Дезодорированное	39	75
7	«518н» (з)	Сепарированное	13	57,5
8	«Слобода» (р)	Рафинированное, дезодорированное, вымороженное	31	82,5

Примечание: (р) — масло куплено в рознице; (з) — масло предоставлено ОАО «ЭФКО»

изменения электромагнитного состояния масла от изменения степени рафинации. Нетрудно заметить, что возрастание характеристических параметров происходит с увеличением степени очистки подсолнечного масла от условно исходного нерафинированного прессового масла («Ставраполье») к вымороженному маслу («1016»), соответствующему завершающему этапу процесса очистки. Наличие в масле «Золотая семечка» (№ 3) молекул воды приводит к заметному снижению показателей по сравнению с более чистым маслом «Золотая семечка» (№ 2). Заметим, что масло «Слобода» (№ 8), купленное в розничной сети, выпадает из полученной зависимости. Такой выброс можно объяснить, например, введением в готовое масло на стадиях, следующих

за рафинацией, дополнительных (стабилизирующих) добавок, выводящих электромагнитное состояние конечного продукта за рамки наблюдаемой закономерности.

Наблюдаемая зависимость имеет экспоненциальный характер, что подтверждается ее спрямлением в полулогарифмических координатах (рис. 3).

Экспериментально полученную зависимость можно представить математически через связь характеристической электропроводности G_{px} с характеристической частотой F_x в диапазоне частот от 30 до 80 кГц в виде

$$G_{px} = 0,442e^{0,0588F_x} \\ (R^2 = 0,9922).$$

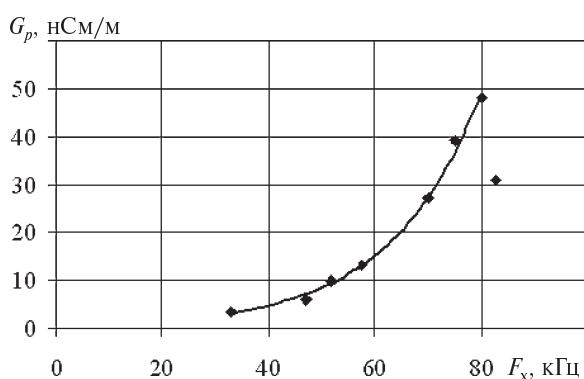


Рис. 2. Связь стадий рафинации подсолнечных масел с характеристическими электропроводностью и частотой электромагнитных колебаний

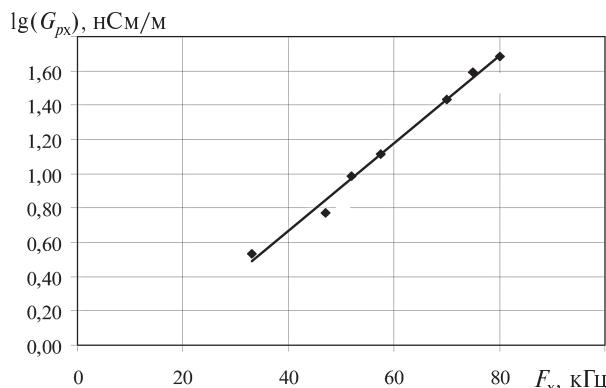


Рис. 3. Связь степени рафинации подсолнечных масел с параметрами электромагнитного состояния



В этой связи можно говорить о существовании закономерной связи физического электромагнитного состояния растительных масел с их физико-химическим составом по отдельным стадиям рафинации.

В настоящее время нет статистически достоверных экспериментальных данных, позволяющих объяснить физическую природу закономерности, т. е. расположения точек пересечения по степеням рафинации на графиках рис. 2 и 3. Опираясь на имеющиеся эксперименты, можно полагать, что причину данного закономерного хода кривой следует искать в особенностях механизма электропроводности масел, связанных с их химическим составом, молекулярным строением и структурой на рассматриваемых стадиях.

ях рафинации. При этом очевидно, что нахождение этой связи как в качественном, так и количественном выражении представляет самостоятельную и весьма сложную задачу, требующую для своего решения применения целого комплекса физико-химических методов анализа и, соответственно, времени.

Сейчас важно подчеркнуть, что представленные экспериментальные данные свидетельствуют о достоверном и закономерном различии показателей электромагнитного состояния масла (характеристических значений электропроводности и частоты) по отдельным стадиям и, следовательно, о возможности технического контроля процесса рафинации предлагаемым методом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усиков, С.В. Определение электропроводности и диэлектрической проницаемости растворов [Текст] / С.В. Усиков // М.: Теза, 1997.— 179 с.

2. Патент на изобретение № 2383010 Способ определения рода жидкостей / Усиков С.В., Астрышева Н.В., Васильева Л.К., Карташов Ю.И., Усиков А.С., Фоменко В.В. — 27 февраля 2010 г.

3. Иголкин, Б.И. Электропроводность растительных масел в зависимости от температуры и частоты электромагнитных колебаний [Текст] / Б.И. Иголкин, Л.К. Васильева, В.В. Васипов, К.Ю. Ребане, В.С. Мехтиев // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. № 2.— С. 278—282.

УДК 625.855.3

Ф.В. Ястребов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКИХ ДВИЖЕНИЙ ДЛЯ ИМИТАЦИИ РАЗРУШЕНИЙ МАКЕТОВ

В современном театре широко используется мехатронное оборудование. Чаще всего применяются управляемые лебедки, площадки, подъемники, накатные площадки, поворотные круги. Использование такого оборудования позволило автоматизировать большую часть механических операций на сцене, которые раньше исполнялись ручным трудом. Сейчас особое значение для постановки современных спектаклей имеют механические подвижные декорации, которые позволяют значительно улучшить качество и эффект представления происходящего на сцене. Важную роль в этом плане играют декорации, которые имитируют разрушения и катастрофы, так как они отвечают за кульминационные части произведения.

Объекты разрушения могут быть как подвижными (фигуры людей, животных, транспорт), так и неподвижными (строения, элементы ландшафта). При проектировании подвижной управляемой декорации возникает проблема создания специальных систем привода, которые должны обладать рядом таких свойств, как компактность, мобильность, низкий уровень шума. Также встает проблема оценки управляемости процесса.

Наиболее простой с точки зрения механизации и достаточно эффективный для зрителя процесс разрушений — опрокидывание. Часто встречающиеся элементы театральных декораций, которые по своим физическим свойствам способны к опрокидыванию — колонны, деревья, башни, мосты,

опоры, пролеты, перекрытия. Все эти объекты при потере устойчивости в основании начинают движение, схожее с вращением вокруг неподвижной точки, которой соответствует опора. Для зрителя важно, чтобы процесс выглядел как можно более реалистичным. Следовательно, необходимо проанализировать движение объекта. В качестве наиболее простого примера целесообразно рассмотреть опрокидывание колонны. Допустим, что по сюжету театрального произведения колонна должна целиком упасть, т. е. из вертикального положения в положение горизонтальное. Схема падения изображена на рис. 1, а.

Очевидно, что для изображения падения колонны необходимо знать базовый закон, по которому будет изменяться угол ее отклонения от вертикали с течением времени. Впоследствии при необходимости для достижения эффектов замедления, ускорения, остановки падения закон движения может быть изменен.

Составим уравнение движения колонны. Известно, что для вращательного движения уравнение имеет вид

$$\frac{d^2\phi(t)}{dt^2}J = M_d, \quad (1)$$

где J — момент инерции вращения (в нашем случае $J = \frac{1}{3}mL^2$), M_d — приложенный крутящий момент. Из схемы на рис. 1, б видно, что

$$M_d = m\frac{L}{2}\cos\phi. \quad (2)$$

Тогда (1) после подстановки имеет вид

$$\frac{d^2\phi(t)}{dt^2}\frac{2}{3}L = g\cos\phi(t). \quad (3)$$

Для того чтобы уравнение (3) имело решение, зададим начальные условия: $\phi_0 = 0,01$ рад, $\omega_0 = 0,001$ рад/с. Длину стержня для упрощения расчетов принимаем равной 1 м. Численное решение уравнения (2) представлено на рис. 2.

Для обеспечения компактного мобильного управления движением стержня предлагается использовать два каната. Стержень нижним концом опирается на шарнирную опору, а к верхней части крепятся два каната, которые намотаны на лебедки (лебедки при необходимости могут быть установлены на разных высотах). Такое крепление стержня обеспечивает возможность установки в начальное положение без использования дополнительного оборудования.

Используя полученное решение для угла наклона, выведем закон движения верхней точки стержня. Это необходимо для определения законов движения управляющих лебедок. Выражения для координат имеют вид

$$\begin{aligned} x_c(t) &= L \sin \phi(t); \\ y_c(t) &= L \cos \phi(t). \end{aligned} \quad (4)$$

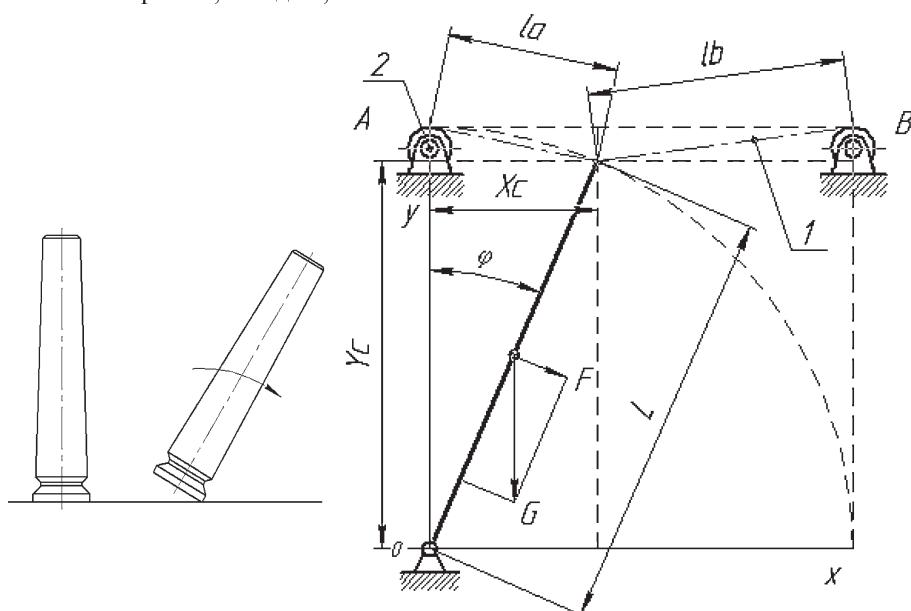


Рис.1. Схема опрокидывания колонны (L — длина стержня, G — сила тяжести, F — перпендикулярная составляющая силы тяжести, ϕ — угол наклона)

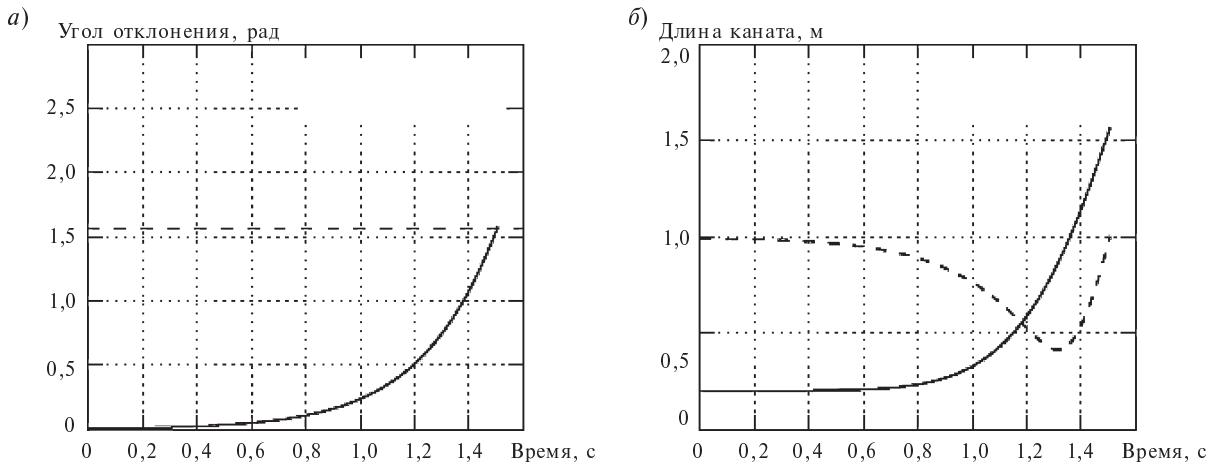


Рис. 2. Изменения угла отклонения (а) и длин канатов (б) при падении колонны:
 $a - P_{hi}(t)$ (—), $P_i/2$ (---); $\beta - L_a(t)$ (—), $L_b(t)$ (---)

Пусть точки выхода канатов имеют такие координаты: $A = (x_a, y_a)$, $B = (x_b, y_b)$. Тогда изменения длин тросов во время падения описываются выражениями

$$\begin{aligned} l_a(t) &= \sqrt{(x_c(t) - x_a)^2 + (y_c(t) - y_a)^2}; \\ l_b(t) &= \sqrt{(x_c(t) - x_b)^2 + (y_c(t) - y_b)^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для координат выхода тросов $A = (0; 1,2)$, $B = (1; 1)$ закон изменения длин тросов показан на графике (см. рис. 2).

Анализируя форму графика изменения угла (рис. 2), отметим, что функцию допустимо условно разбить на два участка, причем граница разделения участков индивидуальна для каждого конкретного варианта исполнения конструкции. На первом участке наблюдается малое увеличение угла относительно максимального значения, а на втором происходит уже заметное увеличение. Таким образом, если необходимо упростить модель, то выполняется замена первого участка на линейную функцию. Если же необходимо заменить функцию второго участка, то тут следует выполнить предварительную анимацию движения и оценить влияние замены. При создании общей картины движения обязательно наличие обоих участков, чтобы процесс выглядел как можно более реалистичнее. Выходит, что для зрительного восприятия важны как первый, так и второй участок. Поскольку на первом участке рост угла незначителен, а затрачиваемое время составляет ощущимую долю от общего време-

ни падения, то здесь целесообразно уделить больше внимания времени протекания процесса. Второй участок описывает опрокидывание со значительным увеличением скорости роста угла, и здесь необходимо уделять внимание как времени протекания процесса, так и значению угловой скорости. По полученным графикам длин канатов видно, что у кривых, как и на графике изменения угла, также будет существенная разность скорости роста между начальным и конечным участком. То есть функцию изменения длин канатов при необходимости также разбивают на два участка. При задании общего закона движения необходимо следить за параметрами движения на обоих участках.

Ключевая задача при изображении опрокидывания — обеспечение качественного восприятия движения объекта, поэтому важно, каких значений угловой скорости достигает декорация. Здесь полезно учитывать явление перспективы, когда кажется, что далеко стоящие объекты — меньше размерами по сравнению с оригиналом. Допустим, необходимо изобразить падение дерева высотой 15 м, но размеры изготавливаемой декораций задают равными 5 м. Вычисленное время падения стержня при различных значениях его длины:

Высота колонны, м	Время падения колонны, с
1	1,506
3	2,600
6	3,666
10	4,718

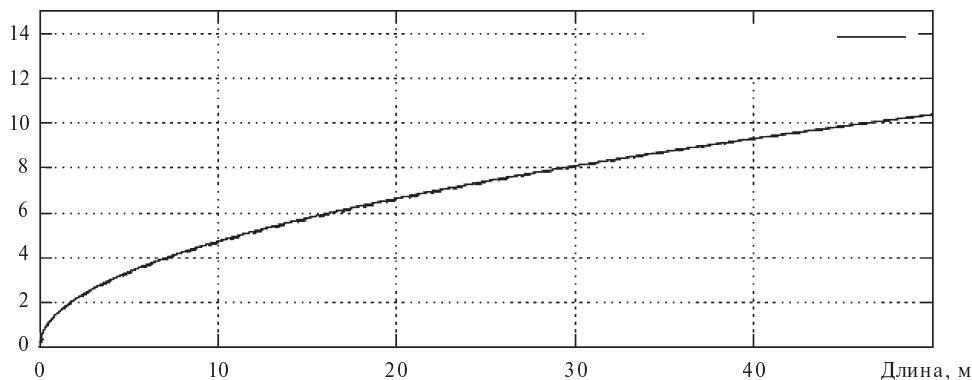


Рис. 3. Изменение времени падения в зависимости от длины колонны (—) и линейная аппроксимация $1,468 \cdot \sqrt{f(x)}$ (---)

15	5,762
20	6,637
35	8,728
50	10,385

Используя полученные значения, построим при помощи программы GnuPlot [3] зависимость времени падения от длины стержня.

Для определения приближенной функции сделаем предположение, что она является полиномом вида $ax^n + b$. Тогда, используя исходные точки, приведенные выше, составим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} a1^n + b = 1,325; \\ a15^n + b = 5,055; \\ a50^n + b = 9,084. \end{cases} \quad (5)$$

Система уравнений имеет приближенное решение: $a = 1,468$, $b = 0$, $n = 0,5$. Отсюда следует уравнение искомой кривой:

$$t = 1,468l^{0.5}. \quad (6)$$

Сравним полученную функцию с исходными данными, построив соответствующие графики (рис. 3). Видно, что найденная закономер-

ность достоверно описывает изменение времени падения от высоты стержня. Полученную функцию рекомендуется использовать для оценки теоретического значения времени опрокидывания объекта.

Начальную фазу движения для упрощения управления рекомендуется заменить линейной зависимостью, а параметры движения второй фазы упрощать нежелательно, так как угловая скорость на этом этапе весьма существенна, и изменения закона движения негативно скажутся на общем восприятии декорации зрителем (движение будет выглядеть неестественным).

При проектировании опрокидывающейся декорации типа колонны рекомендуется применять следующую методику определения закона движения:

1. При заданных начальных условиях необходимо определить закон движения для декорации единичной длины.

2. Используя полученную зависимость времени падения от длины колонны, отмасштабировать по времени полученный закон движения для декорации необходимого размера.

3. Скорректированный закон движения следует использовать в системе управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аппель, П. Теоретическая механика: Том 1 [Текст] / П. Аппель / Пер. И.Г. Малкина с 5-го франц. издания.— М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1960.
2. Конгер, Д. Физика для разработчиков ком-пьютерных игр [Текст] / Д. Конгер / Пер. с англ. А.С. Молявко.— М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. — 520 с.
3. Janert, P.K. Gnuplot in Action [Текст] / P.K. Janert // Manning Publications C°.— 2010.



УДК 624.15:536.3

И.В. Наумов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕАКЦИИ УПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА ПОД ШТАМПОМ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Для расчета балок и плит на упругом основании важными стали два решения теории упругости. Решение Буссинеска [3] для абсолютно жесткого эллиптического штампа на упругом полупространстве в его частном случае — для абсолютно жесткого центрально нагруженного круглого штампа — нашло широкое применение для расчета круглых жестких плит. Второе решение — для абсолютно жесткой полосы в условиях плоской задачи — принадлежит М. Садовскому. Полученные формулы и эпюры реактивных давлений практически одинаковы.

На первых этапах развития теории расчета балок на упругом полупространстве предполагалось, что большого различия результатов в условиях пространственной и плоской задачи нет. Однако исследования показали существенную разницу при расчете ленточных фундаментов. В условиях плоской задачи получаются совершенно недопустимые запасы прочности. А решение в пространственных условиях сложнее, и соответствующих методов предложено меньше.

Приближенный метод Горбунова-Посадова [3] для определения реактивных давлений имеет аналитический характер и основан на применении двойных степенных рядов. Значения коэффициентов определяются из следующих условий:

1) равновесия штампа под действием внешней нагрузки и реактивных давлений;

2) равенства перемещений грунта и штампа в каждой точке опорной площадки.

Приближенность в определении реакции заключается в вычислении коэффициентов степенного ряда.

Решение задач теории упругости в конечном виде для полупространства требует интегрирования совокупных дифференциальных уравнений, что не всегда возможно. Решение некоторых задач теории упругости зависит от выбора системы координат и их комбинаций. При решении можно также задаваться функциями, выражющими напряжения или перемещения

(так называемый обратный способ). Эти функции далее подставляют в уравнения и смотрят, удовлетворяют ли они им. Практически этот способ оказывается очень сложным. Поэтому Сен-Венан предложил полуобратный способ, по которому пренебрегают частью напряжений и перемещений. Воспользовавшись полуобратным способом, можно получить конечное решение — реакцию упругого полупространства под центрально нагруженным прямоугольным штампом.

Принимаем следующие допущения:

1) основание — бесконечная, упругая, однородная изотропная среда;

2) касательные напряжения по контакту основания со штампом равны нулю.

Решение можно получить из уравнения равновесия сил реакции и внешней единичной нагрузки, приложенной в центре прямоугольного штампа площадью $A \times B$.

Второе условие заключается в том, что полученная функция сил реакции, приложенных к упругому полупространству по прямоугольной площадке AB , должна вызывать одинаковую осадку в произвольной точке.

Результат вычислений реакции под прямоугольным штампом с соотношением сторон

$\beta = \frac{a}{b} = 2$ по формуле Горбунова-Посадова дает замкнутую кривую, похожую на эллипс [3]. Так, при координатах $x = \pm 0,5$ м, $y = 0$ имеем $P(x, y) = 0,636 \text{ т}/\text{м}^2$. При $x = 0$, $y = \pm 0,5$ м — $P(x, y) = 0,675 \text{ т}/\text{м}^2$. При увеличении координаты x до величины $\pm 0,59$ м значения приближаются к $P(x, y) = 0,675 \text{ т}/\text{м}^2$. Отложив по оси z величину $P(x, y) = 0,675 \text{ т}/\text{м}^2$, проведя через эти четыре точки кривую, получим кривую, похожую на эллипс.

Поэтому для подбора первоначальная функция реакции основания имеет вид

$$\varphi = \left[\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + C \right],$$

где $2a, 2b$ — стороны прямоугольника (рис. 1).

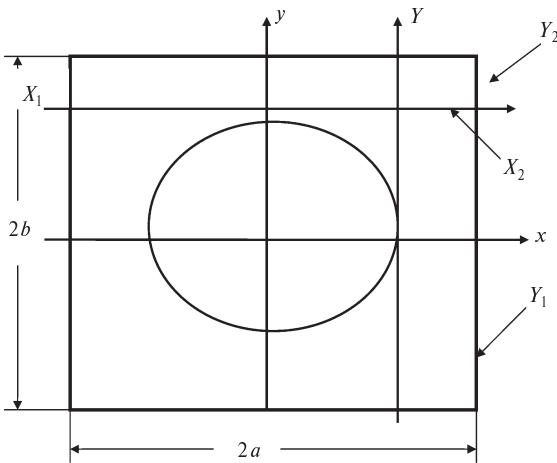


Рис. 1. Схема расположения площадки нагружения и штампа в принятых координатах

Условие равновесия сил реакции и равномерно распределенной нагрузки $Q = 1/(2a2b)$, приложенной к прямоугольной площадке $2a \times 2b$, выразится следующим образом:

$$\int_0^{b/2} \int_0^{a/2} Q \left[\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + C \right] dx dy = P = 1. \quad (1)$$

Проинтегрируем и получим C :

$$\begin{aligned} & \int_{-b-a}^b \int_{-a}^a \left[\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + C \right] dx dy = \\ &= \int_{-b}^b \left[\frac{x^3}{3a^2} + \frac{xy^2}{b^2} + cx \right]_{-a}^a dy = \\ &= 2a \int_{-b}^b \left[\frac{1}{3} + \frac{y^2}{b^2} + c \right] dy = 2a2b \left[\frac{1}{3} + \frac{1}{3} + C \right]. \end{aligned}$$

Из уравнения $2a2bQ \left[\frac{1}{3} + \frac{1}{3} + C \right] = 1$ получим

$$C = 1/3.$$

Введем следующее обозначение:

$$\varphi = Q \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + 1/3 \right) = R^1(x, y).$$

Для составления второго уравнения необходимо получить функцию вертикальных перемещений в произвольной точке под прямоугольной площадкой от действия сил реакции. Используя

решение Буссинеска и [11] для сосредоточенной силы, получим

$$\begin{aligned} & \frac{1-\mu^2}{\pi E} \int_{Y_1}^{Y_2} \int_{X_1}^{X_2} \frac{R^1(x, y) dx dy}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \\ &= \frac{1-\mu^2}{\pi E} Q \int_{Y_1}^{Y_2} \int_{X_1}^{X_2} \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \times \\ & \times \left[\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} \right) + 1/3 \right] dx dy = \Delta Z. \end{aligned}$$

Вычисление первого интеграла:

$$\begin{aligned} & \int_{Y_1}^{Y_2} \int_{X_1}^{X_2} \frac{1}{a^2} \frac{x^2}{\sqrt{x^2 + y^2}} dx dy = \\ &= \frac{1}{2a^2} \int_{Y_1}^{Y_2} \left[X_2 \sqrt{X_2^2 + y^2} - X_1 \sqrt{X_1^2 + y^2} - \right. \\ & \left. - y^2 \ln \left(X_2 + \sqrt{X_2^2 + y^2} \right) + y^2 \ln \left(X_1 + \sqrt{X_1^2 + y^2} \right) \right] dy. \end{aligned}$$

Подробное вычисление первого интеграла:

$$\begin{aligned} & A. \int_{Y_1}^{Y_2} X_2 \sqrt{X_2^2 + y^2} dy = \\ &= X_2 \left[\frac{y}{2} \sqrt{X_2^2 + y^2} + \frac{X_2^2}{2} \ln \left(y + \sqrt{X_2^2 + y^2} \right) \right]_{Y_1}^{Y_2} = \\ &= \frac{X_2}{4} \left[Y_2 \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} - Y_1 \sqrt{X_2^2 + Y_1^2} + \right. \\ & \left. + X_2^2 \ln \frac{Y_2 + \sqrt{X_2^2 + Y_2^2}}{Y_1 + \sqrt{X_2^2 + Y_1^2}} \right]. \end{aligned}$$

Б. При вычислении следующей части интеграла сделаем подстановки

$$v = \frac{y^3}{3} \text{ и } u = \ln \left(X_2 + \sqrt{X_2^2 + y^2} \right).$$

Тогда $y^2 dy = dv$ и

$$du = \frac{1}{X_2 + \sqrt{X_2^2 + y^2}} \frac{y dy}{\sqrt{X_2^2 + y^2}} =$$



$$\begin{aligned}
 &= \frac{X_2 - \sqrt{X_2^2 + y^2}}{X_2^2 - X_2^2 - y^2} \frac{y dy}{\sqrt{X_2^2 + y^2}} = \\
 &= \left(-\frac{X_2}{y\sqrt{X_2^2 + y^2}} + \frac{1}{y} \right) dy.
 \end{aligned}$$

Соответственно

$$\begin{aligned}
 &\int_{Y_1}^{Y_2} y^2 \frac{1}{2} \ln \left(X_2 + \sqrt{X_2^2 + y^2} \right) dy = \\
 &= \frac{1}{2} \left[\frac{y^3}{3} \ln \left(X_2 + \sqrt{X_2^2 + y^2} \right) \right]_{Y_1}^{Y_2} + \\
 &\quad + \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{X_2 y^2 dy}{3\sqrt{y^2 + X_2^2}} - \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{y^2 dy}{3} = \\
 &= \left[\frac{y^3}{6} \ln \left(X_2 + \sqrt{X_2^2 + y^2} \right) + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{X_2}{6} \frac{y}{2} \sqrt{X_2^2 + y^2} \right] - \\
 &\quad - \frac{X_2^3}{12} \ln \left(y + \sqrt{X_2^2 + y^2} \right) - \frac{1}{3} \frac{y^3}{3} \Big|_{Y_1}^{Y_2} = \\
 &= \frac{Y_2^3}{6} \ln \left(X_2 + \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} \right) - \\
 &\quad - \frac{Y_1^3}{6} \ln \left(X_2 + \sqrt{X_2^2 + Y_1^2} \right) + \\
 &\quad + \frac{X_2 Y_2}{12} \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} - \frac{X_2 Y_1}{12} \sqrt{X_2^2 + Y_1^2} - \\
 &\quad - \frac{X_2^3}{12} \ln \left(Y_2 + \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} \right) + \\
 &\quad + \frac{X_2^3}{12} \ln \left(Y_1 + \sqrt{Y_1^2 + X_2^2} \right) - \frac{Y_2^3}{9} + \frac{Y_1^3}{9} = \\
 &= \frac{Y_2^3}{6} \ln \left(X_2 + \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} \right) - \\
 &\quad - \frac{Y_1^3}{6} \ln \left(X_2 + \sqrt{X_2^2 + Y_1^2} \right) + \frac{X_2 Y_2}{12} \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} - \\
 &\quad - \frac{X_2 Y_1}{12} \sqrt{X_2^2 + Y_1^2} - \frac{X_1 Y_2}{12} \sqrt{X_1^2 + Y_2^2} - \\
 &\quad - \frac{X_1 Y_1}{12} \sqrt{X_1^2 + Y_1^2} - \frac{X_1^3}{12} \ln \left(\frac{Y_2 + \sqrt{X_2^2 + Y_2^2}}{Y_1 + \sqrt{X_2^2 + Y_1^2}} \right) = \\
 &= \frac{1}{3a^2} \left[\frac{1}{2} X_2 Y_2 \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} - \frac{1}{2} X_2 Y_1 \sqrt{X_2^2 + Y_1^2} + \right. \\
 &\quad \left. + X_2^3 \ln \left(\frac{Y_2 + \sqrt{X_2^2 + Y_2^2}}{Y_1 + \sqrt{X_2^2 + Y_1^2}} \right) - \frac{1}{2} X_1 Y_2 \sqrt{X_1^2 + Y_2^2} + \right. \\
 &\quad \left. + X_1^3 \ln \left(\frac{Y_2 + \sqrt{X_1^2 + Y_2^2}}{Y_1 + \sqrt{X_1^2 + Y_1^2}} \right) - \frac{1}{2} X_1 Y_1 \sqrt{X_1^2 + Y_1^2} + \right]
 \end{aligned}$$

Суммирование частей первого (A) интеграла:

$$\begin{aligned}
 &\frac{1}{a^2} \left[\frac{X_2}{4} \left[Y_2 \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} - Y_1 \sqrt{X_2^2 + Y_1^2} \right] + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{X_2^3}{4} \ln \left(\frac{Y_2 + \sqrt{X_2^2 + Y_2^2}}{Y_1 + \sqrt{X_2^2 + Y_1^2}} \right) \right] -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &- \frac{X_1}{4} \left[Y_2 \sqrt{X_1^2 + Y_2^2} - Y_1 \sqrt{X_1^2 + Y_1^2} \right] - \\
 &- \frac{X_1^3}{4} \ln \left(\frac{Y_2 + \sqrt{X_1^2 + Y_2^2}}{Y_1 + \sqrt{X_1^2 + Y_1^2}} \right) -
 \end{aligned}$$

$$-\frac{Y_2^3}{6} \ln \left(X_2 + \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} \right) +$$

$$\begin{aligned}
 &+ \frac{Y_1^3}{6} \ln \left(X_2 + \sqrt{X_2^2 + Y_1^2} \right) - \frac{X_2 Y_2}{12} \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} + \\
 &+ \frac{X_2 Y_1}{12} \sqrt{X_2^2 + Y_1^2} + \frac{X_2^3}{12} \ln \left(\frac{Y_2 + \sqrt{X_2^2 + Y_2^2}}{Y_1 + \sqrt{X_2^2 + Y_1^2}} \right) +
 \end{aligned}$$

$$+\frac{Y_2^3}{6} \ln \left(X_1 + \sqrt{X_1^2 + Y_2^2} \right) -$$

$$-\frac{Y_1^3}{6} \ln \left(X_1 + \sqrt{X_1^2 + Y_1^2} \right) + \frac{X_1 Y_2}{12} \sqrt{X_1^2 + Y_2^2} -$$

$$-\frac{X_1 Y_1}{12} \sqrt{X_1^2 + Y_1^2} - \frac{X_1^3}{12} \ln \left(\frac{Y_2 + \sqrt{X_1^2 + Y_2^2}}{Y_1 + \sqrt{X_1^2 + Y_1^2}} \right) =$$

$$=\frac{1}{3a^2} \left[\frac{1}{2} X_2 Y_2 \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} - \frac{1}{2} X_2 Y_1 \sqrt{X_2^2 + Y_1^2} + \right.$$

$$\left. + X_2^3 \ln \left(\frac{Y_2 + \sqrt{X_2^2 + Y_2^2}}{Y_1 + \sqrt{X_2^2 + Y_1^2}} \right) - \frac{1}{2} X_1 Y_2 \sqrt{X_1^2 + Y_2^2} + \right. \\
 &\quad \left. + X_1^3 \ln \left(\frac{Y_2 + \sqrt{X_1^2 + Y_2^2}}{Y_1 + \sqrt{X_1^2 + Y_1^2}} \right) - \frac{1}{2} X_1 Y_1 \sqrt{X_1^2 + Y_1^2} + \right]$$

$$\begin{aligned}
 & +\frac{1}{2}X_1Y_1\sqrt{X_1^2+Y_1^2}-X_1^3\ln\left(\frac{Y_2+\sqrt{X_1^2+Y_2^2}}{Y_1+\sqrt{X_1^2+Y_1^2}}\right)- \\
 & -\frac{1}{2}Y_2^3\ln\left(\frac{X_2+\sqrt{X_2^2+Y_2^2}}{X_1+\sqrt{X_1^2+Y_2^2}}\right)+ \\
 & +\frac{1}{2}Y_1^3\ln\left(\frac{X_2+\sqrt{X_2^2+Y_1^2}}{X_1+\sqrt{X_1^2+Y_1^2}}\right)=\frac{Q_1}{3a^2}.
 \end{aligned}$$

Суммирование частей второго (Б) интеграла:

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{b^2}\left[\frac{1}{2}X_2Y_2\sqrt{X_2^2+Y_2^2}-\frac{1}{2}X_1Y_2\sqrt{Y_2^2+X_1^2}+\right. \\
 & \left.+Y_2^3\ln\left(\frac{X_2+\sqrt{X_2^2+Y_2^2}}{X_1+\sqrt{X_1^2+Y_2^2}}\right)-\frac{1}{2}X_2Y_1\sqrt{Y_1^2+X_2^2}+\right. \\
 & \left.+\frac{1}{2}X_1Y_1\sqrt{X_1^2+Y_1^2}-Y_1^3\ln\left(\frac{X_2+\sqrt{X_2^2+Y_1^2}}{X_1+\sqrt{X_1^2+Y_1^2}}\right)\right.- \\
 & -\frac{1}{2}X_2^3\ln\left(\frac{Y_2+\sqrt{Y_2^2+X_2^2}}{Y_1+\sqrt{Y_1^2+X_2^2}}\right)+ \\
 & +\frac{1}{2}X_1^3\ln\left(\frac{Y_2+\sqrt{Y_2^2+X_1^2}}{Y_1+\sqrt{Y_1^2+X_1^2}}\right)=\frac{Q_2}{3b^2}.
 \end{aligned}$$

Возьмем теперь третий интеграл:

$$\begin{aligned}
 & \int_{Y_1}^{Y_2}\int_{X_1}^{X_2}\frac{dxdy}{\sqrt{x^2+y^2}}= \\
 & =\int_{Y_1}^{Y_2}\ln\left(x+\sqrt{x^2+y^2}\right)\Big|_{X_1}^{X_2}dy= \\
 & =\left[Y_2\ln\left(\frac{X_2+\sqrt{X_2^2+Y_2^2}}{X_1+\sqrt{X_1^2+Y_2^2}}\right)-Y_1\ln\left(\frac{X_2+\sqrt{X_2^2+Y_1^2}}{X_1+\sqrt{X_1^2+Y_1^2}}\right)\right.+ \\
 & \left.+X_2\ln\left(\frac{Y_2+\sqrt{Y_2^2+X_2^2}}{Y_1+\sqrt{Y_1^2+X_2^2}}\right)-\right.
 \end{aligned}$$

$$\left.-X_1\ln\left(\frac{Y_2+\sqrt{Y_2^2+X_1^2}}{Y_1+\sqrt{Y_1^2+X_1^2}}\right)\right]=D.$$

В результате интегрирования получены зависимости в виде конечного интеграла. Теперь после алгебраических преобразований получим функцию осадки:

Обозначим 1-й, 2-й и 3-й интегралы соответственно через Q_1 , Q_2 и D . Тогда

$$\Delta Z=\frac{(1-\mu^2)Q}{\pi E}\frac{1}{3}\left(\frac{Q_1}{a^2}+\frac{Q_2}{b^2}+d\right).$$

Рассмотрим на плоскости упругого полупространства две одинаковые площадки нагружения $2ax \times 2b$. Левую площадку обозначим символом a , правую — b . Нагрузка левой площадки выражается начальной функцией реакции $\phi(x, y)$, нагрузка правой — равномерно распределенная. Суммарные нагрузки левой и правой площадки равны соответственно $P_a = 1$ т, $P_b = 1$ т. Потенциальная энергия деформации упругого полупространства под площадками нагружения:

$$\begin{aligned}
 P_a Z_{acp} &= P_b Z_{cp\phi}; \\
 1 \cdot Z_{acp} &= 1 \cdot Z_{cp\phi}.
 \end{aligned}$$

Определим средние перемещения. В интегральной форме среднее перемещение выразится следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2a2b}\int_{-a-b}^a\int_{-b}^b\Delta Z dxdy= \\
 & =Z_{acp}\frac{1}{2a2b}\int_{-a-b}^a\int_{-b}^b\Delta Z^b dxdy=Z_{cp\phi}.
 \end{aligned}$$

Введя в левую часть равенства $\alpha(X_1, X_2, Y_1, Y_2)$ и ΔZ , уравнение можно представить так:

$$\alpha(X_1, X_2, Y_1, Y_2)\Delta Z = Z_{cp\phi}.$$

Заменим ΔZ его конечной интегральной формой, полученной ранее:

$$\begin{aligned}
 \alpha(X_1, X_2, Y_1, Y_2)\Delta Z &= \frac{(1-\mu^2)}{\pi E}\frac{Q}{3}\left(\frac{Q_1}{a^2}+\frac{Q_2}{b^2}+D\right)= \\
 & =\frac{1-\mu^2}{\pi E}\alpha\int_{Y_1}^{Y_2}\int_{X_1}^{X_2}\frac{R^1(x, y)dxdy}{\sqrt{x^2+y^2}}=\frac{1-\mu^2}{\pi E}\alpha Q\times
 \end{aligned}$$



$$\times \int_{Y_1}^{Y_2} \int_{X_1}^{X_2} \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \left[\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} \right) + 1/3 \right] dx dy = Z_{cp\phi}. \quad (2)$$

Из уравнения (2) видим, что $\alpha(X_1, X_2, Y_1, Y_2)$ является коэффициентом функции реакции.

Для упрощения умножим обе части уравнения (2) на дробь $\frac{\pi E}{(1-\mu^2)Q}$ и получим

$$\alpha \frac{1}{3} \left(\frac{Q_1}{a^2} + \frac{Q_2}{b^2} + D \right) = 2Z_{cp\phi}^1; \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{6Z_{cp\phi}^1}{K}; \quad (4)$$

$$K = \frac{Q_1}{a^2} + \frac{Q_2}{b^2} + D; \quad (5)$$

$$Z_{cp\phi} = (1-\mu^2) \frac{2Q}{\pi E} \left[A \ln \frac{B + \sqrt{B^2 + A^2}}{A} + \right. \\ \left. + B \ln \frac{A + \sqrt{B^2 + A^2}}{B} - \frac{(A^2 + B^2)^{3/2} - (A^3 + B^3)}{3AB} \right],$$

где $Z_{cp\phi}$ — средняя осадка под прямоугольной площадкой нагруженной равномерно распределенной нагрузкой (см. решение Фогта [2, 12]).

$$Z_{cp\phi}^1 \left[A \ln \frac{B + \sqrt{B^2 + A^2}}{A} + B \ln \frac{A + \sqrt{B^2 + A^2}}{B} - \right. \\ \left. - \frac{(A^2 + B^2)^{3/2} - (A^3 + B^3)}{3AB} \right] = \\ = 2 \left[a \ln \frac{b + \sqrt{a^2 + b^2}}{a} + b \ln \frac{a + \sqrt{b^2 + a^2}}{b} - \right. \\ \left. - \frac{1}{3} \frac{(a^2 + b^2)^{3/2} - (a^3 + b^3)}{ab} \right]. \quad (6)$$

Окончательно функцию реакции можно записать в таком виде:

$$R^r = P\alpha \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{1}{3} \right),$$

где P — равномерно распределенная нагрузка.

Проверим полученную формулу по уравнению равенства потенциальной энергии деформации упругого полупространства под площадками нагружения:

$$\left(\int_{-b-a}^b \int_{-a}^a R^r dx dy \right) Z_{cp}^a = P^e Z_{cp\phi};$$

$$\left(\int_{-b-a}^b \int_{-a}^a P\alpha \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{1}{3} \right) dx dy \right) \times$$

$$\times \left(\frac{1}{2a2b} \int_{-b-a}^b \int_{-a}^a \Delta Z dx dy \right) = P^e Z_{cp\phi};$$

$$\left[\int_{-b-a}^b \int_{-a}^a \alpha(R^1(x, y)) dx dy \right] \times$$

$$\times \frac{1}{2a2b} \int_{-b-a}^b \int_{-a}^a \left[\frac{1-\mu^2}{\pi E} \int_{Y_1}^{Y_2} \int_{X_1}^{X_2} \frac{R^1(x, y) dx dy}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right] dx dy =$$

$$= P^e Z_{cp\phi};$$

$$\left[\int_{-b-a}^b \int_{-a}^a P\alpha \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{1}{3} \right) dx dy \right] Z_{cp}^a =$$

$$= P^e Z_{cp\phi},$$

где $Z_{cp}^a = Z_{cp\phi}$.

Полученная формула реакции удовлетворяет условию равновесия приложенной единичной нагрузки. Под действием этих сил перемещения во всех точках одинаковы:

$$\int_{-b-a}^b \int_{-a}^a P\alpha \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{1}{3} \right) dx dy = P^e = 1.$$

Проверим размерность полученной формулы. Часть формулы, находящаяся в скобках, —

$\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}\right)$ — безразмерна. Определим размерность $\alpha = \frac{6Z_{\text{срф}}^1}{K}$. Размерность $Z_{\text{срф}}^1$ — [м], К —

так же; таким образом, α — величина безразмерная. По размерности полученная формула соответствует функции реакции.

Для того чтобы формула была удобна и понятна для расчетов, выразим координаты X_2, X_1, Y_2, Y_1 через координаты x и y (см. рис. 1):

$$X_2 = (a-x), \quad X_1 = -(a+x), \quad Y_2 = (b-y), \\ Y_1 = (b+y).$$

Тогда

$$Q_1 = \frac{1}{2}(a-x)(b-y)\sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2} + \\ + \frac{1}{2}(a-x)(b+y)\sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2} + \\ + (a-x)^3 \ln \left(\frac{b-y + \sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2}}{-(b+y) + \sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2}} \right) + \\ + \frac{1}{2}(a+x)(b-y)\sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2} + \\ + \frac{1}{2}(a+x)(b+y)\sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2} + \\ + (a+x)^3 \ln \left(\frac{b-y + \sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2}}{-(b+y) + \sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2}} \right) - \\ - \frac{1}{2}(b-y)^3 \ln \left(\frac{a-x + \sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2}}{-(a+x) + \sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2}} \right) - \\ - \frac{1}{2}(b+y)^3 \ln \left(\frac{a-x + \sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2}}{-(a+x) + \sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2}} \right);$$

$$Q_2 = \frac{1}{2}(a-x)(b-y)\sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2} + \\ + \frac{1}{2}(a+x)(b-y)\sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2} +$$

$$+ (b-y)^3 \ln \left(\frac{a-x + \sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2}}{-(a+x) + \sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2}} \right) + \\ + \frac{1}{2}(a-x)(b+y)\sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2} + \\ + \frac{1}{2}(a+x)(b+y)\sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2} + \\ + (b+y)^3 \ln \left(\frac{a-x + \sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2}}{-(a+x) + \sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2}} \right) - \\ - (b+y)^3 \ln \left(\frac{b-y + \sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2}}{-(b+y) + \sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2}} \right);$$

$$D = (b-y) \ln \left(\frac{a-x + \sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2}}{-(a+x) + \sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2}} \right) + \\ + (b+y) \ln \left(\frac{a-x + \sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2}}{-(a+x) + \sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2}} \right) + \\ + (a-x) \ln \left(\frac{b-y + \sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2}}{-(b+y) + \sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2}} \right) + \\ + (a+x) \ln \left(\frac{b-y + \sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2}}{-(b+y) + \sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2}} \right).$$

Теперь преобразуем K :

$$K = \frac{Q_1}{a^2} + \frac{Q_2}{b^2} + D = \left(\frac{1}{2a^2} + \frac{1}{2b^2} \right) \times$$

$$\times \left[(a-x)(b-y)\sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2} + \right]$$



$$\begin{aligned}
& + (a+x)(b-y)\sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2} + \\
& + (a-x)(b+y)\sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2} + \\
& + (a+x)(b+y)\sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2} \Big] + \\
& + \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{2b^2} \right) \times \\
& \times \left[(a-x)^3 \ln \left(\frac{b-y + \sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2}}{-(b+y) + \sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2}} \right) + \right. \\
& \left. + (a+x)^3 \ln \left(\frac{b-y + \sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2}}{-(b+y) + \sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2}} \right) \right] + \\
& + \left(\frac{1}{b^2} - \frac{1}{2a^2} \right) \times \\
& \times \left[(b-y)^3 \ln \left(\frac{a-x + \sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2}}{-(a+x) + \sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2}} \right) + \right. \\
& \left. + (b+y)^3 \ln \left(\frac{a-x + \sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2}}{-(a+x) + \sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2}} \right) \right] + \\
& + \left[(b-y) \ln \left(\frac{a-x + \sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2}}{-(a+x) + \sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2}} \right) + \right. \\
& \left. + (b+y) \ln \left(\frac{a-x + \sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2}}{-(a+x) + \sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2}} \right) + \right. \\
& \left. + (a-x) \ln \left(\frac{b-y + \sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2}}{-(b+y) + \sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2}} \right) + \right. \\
& \left. + (a+x) \ln \left(\frac{b-y + \sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2}}{-(b+y) + \sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2}} \right) \right]. \quad (7)
\end{aligned}$$

Итак, мы получили простую формулу реакции: в ней осталось из шести координат только две.

Проанализируем полученную формулу и определим, в каких точках функция принимает максимальные и минимальные значения. Из решений, полученных другими авторами [2, 5] мы знаем: минимальное значение функция реакции должна иметь в центре под штампом, а максимальные значения должны быть в угловых точках прямоугольника.

При $x = y = 0$ $R^r(x, y)$ должно быть равно $R^r(x, y)_{\min}$.

$$\begin{aligned}
K_{\min} = & \left(\frac{1}{2a^2} + \frac{1}{2b^2} \right) 4ab\sqrt{a^2 + b^2} + \\
& + 2 \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{2b^2} \right) a^3 \ln \left(\frac{b + \sqrt{(a)^2 + (b)^2}}{-(b) + \sqrt{(a)^2 + (b)^2}} \right) + \\
& + 2 \left(\frac{1}{b^2} - \frac{1}{2a^2} \right) b^3 \ln \left(\frac{a + \sqrt{(a)^2 + (b)^2}}{-(a) + \sqrt{(a)^2 + (b)^2}} \right) + \\
& + \left[2a \ln \left(\frac{b + \sqrt{(a)^2 + (b)^2}}{-(b) + \sqrt{(a)^2 + (b)^2}} \right) + \right. \\
& \left. + 2b \ln \left(\frac{a + \sqrt{(a)^2 + (b)^2}}{-(a) + \sqrt{(a)^2 + (b)^2}} \right) \right].
\end{aligned}$$

Произведем расчет для конкретной площадки нагружения — $a = b = 1$ м (соответствует площадке нагружения 2×2 м) при $P = 1$ т/м²:

$$\begin{aligned}
Z_{cp}^1 = & 2 \left[a \ln \frac{b + \sqrt{a^2 + b^2}}{a} + b \ln \frac{a + \sqrt{b^2 + a^2}}{b} - \right. \\
& \left. - \frac{1}{3} \frac{\left(a^2 + b^2 \right)^{3/2} - (a^3 + b^3)}{ab} \right] =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 2 \cdot 2 \ln(1 + \sqrt{2}) - 2 \frac{(1+1)^{3/2} - (1+1)}{3} = \\
 &= 2 \left[2 \ln(1 + \sqrt{2}) - \frac{2^{3/2} - 2}{3} \right] = \\
 &= 2 \left[2 \ln 2,414 - \frac{(2,828 - 2)}{3} \right] = 2 \cdot 1,762 - 082 / 3 = \\
 &= 2,973;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R^r(x, y)_{\min} &= \frac{1}{3} \alpha = \frac{6Z_{\text{cp}}^1}{K_{\min}} \frac{1}{3} = \frac{2Z_{\text{cp}}^1}{K_{\min}}; \\
 K_{\min} &= 4\sqrt{2} + \ln \left(\frac{1+\sqrt{2}}{-1+\sqrt{2}} \right) + \ln \left(\frac{1+\sqrt{2}}{-1+\sqrt{2}} \right) + \\
 &+ 4 \ln \left(\frac{1+\sqrt{2}}{-1+\sqrt{2}} \right) = 4\sqrt{2} + 6 \ln \left(\frac{1+\sqrt{2}}{-1+\sqrt{2}} \right) = \\
 &= 4 \cdot 1,4142 + 6 \cdot 1,76272 = 16,224; \\
 R^r(x, y)_{\min} &= \frac{2 \cdot 2,973}{16,224} = 0,367 \text{ Т/м}^2.
 \end{aligned}$$

Возьмем координаты верхней правой угловой точки, где $R^r(x, y)$ должно принимать значение $R^r(x, y)_{\max}$. При $x = a, y = b$ вычислим следующие значения:

$$\begin{aligned}
 K_{\max} &= \left(\frac{1}{2a^2} + \frac{1}{2b^2} \right) 2a2b\sqrt{4a^2 + 4b^2} + \\
 &+ \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{2b^2} \right) 8a^3 \ln \left(\frac{\sqrt{4a}}{-2b + \sqrt{4a^2 + 4b^2}} \right) + \\
 &+ \left(\frac{1}{b^2} - \frac{1}{2a^2} \right) 8^3 b \ln \left(\frac{\sqrt{4b^2}}{-2a + \sqrt{4a^2 + 4b^2}} \right) + \\
 &+ 2a \ln \left(\frac{\sqrt{4a}}{-2b + \sqrt{4a^2 + 4b^2}} \right) + \\
 &+ 2b \ln \left(\frac{\sqrt{4b^2}}{-2a + \sqrt{4a^2 + 4b^2}} \right);
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R^r(x, y)_{\max} &= \left(\frac{4a^2}{4a^2} + \frac{4b^2}{4b^2} + \frac{1}{3} \right) \alpha = \\
 &= \left(1 + 1 + \frac{1}{3} \right) \frac{6Z_{\text{cp}}^1}{K_{\max}} = \frac{42Z_{\text{cp}}^1}{3K_{\max}}.
 \end{aligned}$$

При $a = b = 1$.

$$\begin{aligned}
 K_{\max} &= 4\sqrt{8} + 3 \ln \left(\frac{2}{-2 + \sqrt{8}} \right) = \\
 &= 4 \cdot 2,828 + 12 \cdot 0,8817 = 9,128 + 10,58 = 19,71; \\
 R^r(x, y)_{\max} &= \frac{42 \cdot 2,973}{3 \cdot 21,89} = 1,901 \text{ Т/м}^2.
 \end{aligned}$$

Функция $R^r(x, y)$ непрерывна на участке $[2a, 2b]$. Максимальные значения она принимает в угловых точках, минимальные — в центре площадки. Значения функции $R^r(x, y)$ откладываются по оси Z . Плоскостью, которая параллельна плоскости XOY с координатой, равной единице, рассечем поверхность $R^r(x, y)$ на две части. Геометрически получим замкнутую кривую пересечения функции $R^r(x, y)$ с плоскостью. В точках пересечения x_n, y_n функция реакции будет принимать значение, равное единице. По первому условию подбора функции реакции точки x_n, y_n будут удовлетворять условиям теоремы о среднем значении: $R^r(x_n, y_n) = 1$.

Согласно теореме о среднем

$$\begin{aligned}
 &\frac{1}{2a2b} \int_{-a-b}^a \int_{-b}^b R^r(x, y) dx dy = \\
 &= \frac{1}{2a2b} R^r(x_n, y_n) [a - (-a)][b - (-b)] = 1.
 \end{aligned}$$

Условие равновесия единичной силы, приложенной в центре прямоугольного штампа, и реакции упругого полупространства под штампом выполнены.

Геометрически это означает, что некоторый объем $1 \times 2a \times 2b$ равен объему, заключенному между площадкой $2a \times 2b$ на плоскости XOY и функцией $R^r(x, y)$.

Окончательно получена следующая формула реакции основания под прямоугольным штампом:



$$\begin{aligned}
R^r(x, y) = P \alpha \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{1}{3} \right), \\
+ (b+y)^3 \ln \left(\frac{a-x+\sqrt{(a-x)^2+(b+y)^2}}{-(a+x)+\sqrt{(a+x)^2+(b+y)^2}} \right) \\
+ (b-y) \ln \left(\frac{a-x+\sqrt{(a-x)^2+(b-y)^2}}{-(a+x)+\sqrt{(a+x)^2+(b-y)^2}} \right) \\
+ (b+y) \ln \left(\frac{a-x+\sqrt{(a-x)^2+(b+y)^2}}{-(a+x)+\sqrt{(a+x)^2+(b+y)^2}} \right) \\
+ (a-x) \ln \left(\frac{b-y+\sqrt{(a-x)^2+(b-y)^2}}{-(b+y)+\sqrt{(a-x)^2+(b-y)^2}} \right) \\
+ (a+x) \ln \left(\frac{b-y+\sqrt{(a+x)^2+(b-y)^2}}{-(b+y)+\sqrt{(a+x)^2+(b+y)^2}} \right).
\end{aligned}$$

где $\alpha = \frac{6Z_{\text{cp}\Phi}^1}{K}$,

$$Z_{\text{cp}\Phi}^1 = 2 \left[a \ln \frac{b+\sqrt{a^2+b^2}}{a} + b \ln \frac{a+\sqrt{b^2+a^2}}{b} - \right. \\
\left. - \frac{1}{3} \frac{(a^2+b^2)^{\frac{3}{2}} - (a^3+b^3)}{ab} \right];$$

$$K = \frac{Q_1}{a^2} + \frac{Q_2}{b^2} + D = \left(\frac{1}{2a^2} + \frac{1}{2b^2} \right) \times$$

$$\begin{aligned}
& \times \left[(a-x)(b-y) \sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2} + \right. \\
& + (a+x)(b-y) \sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2} + \\
& + (a-x)(b+y) \sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2} + \\
& \left. + (a+x)(b+y) \sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2} \right] + \\
& + \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{2b^2} \right) \times
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left[(a-x)^3 \ln \left(\frac{b-y+\sqrt{(a-x)^2+(b-y)^2}}{-(b+y)+\sqrt{(a-x)^2+(b+y)^2}} \right) + \right. \\
& \left. + (a+x)^3 \ln \left(\frac{b-y+\sqrt{(a+x)^2+(b-y)^2}}{-(b+y)+\sqrt{(a+x)^2+(b+y)^2}} \right) \right] +
\end{aligned}$$

$$+ \left(\frac{1}{b^2} - \frac{1}{2a^2} \right) \times$$

$$\times \left[(b-y)^3 \ln \left(\frac{a-x+\sqrt{(a-x)^2+(b-y)^2}}{-(a+x)+\sqrt{(a+x)^2+(b-y)^2}} \right) + \right.$$

Ниже приведены расчеты сил реакции упругого полупространства под жестким центрально нагруженным штампом 2×2 м от равномерно распределенной нагрузки $1/(2a \times 2b)$.

В табл. 1 приведены расчеты сил реакции для точек, находящихся на оси X . В табл. 2 приведен расчет сил реакции по диагональной линии квадратной площадки нагружения. Функция реакции принимает значения, равные единице, на осевых линиях при $x = \pm 0,824$ м, $y = 0$ и $y = \pm 0,824$ м, $x = 0$. На линии диагоналей квадратной площадки, где функция принимает единичные значения, координаты равны $x = y = \pm 0,6$ м.

На графике 2 реакционные силы $R1$ рассчитаны по формуле и табличным коэффициентам, приведенным в работе [3]. График выполнен сплошной линией.

Как видим из расчета, наибольшее значение функция реакции принимает в угловой точке под штампом. По периметру площадки функция реакции не принимает бесконечных значений. Объясняется это конечными перемещениями по периметру площадки нагружения. Методики решения и получения формул реакции упругого полупространства в работах [3, 5, 6], существенно отличаются от предложенных в настоящей работе. Реакция упругого полупространства по периметру круглого и прямоугольного штампа принимает значение бесконечность.

Таблица 1

**Расчет сил реакции $R^r(x, y)$ квадратного штампа,
нагруженного единичной силой,
при движении расчетной точки вдоль оси x (рис. 2)**

Номер расчетной точки	x	y	R
1	-0,99999	0	1,24
2	-0,75	0	0,87
3	-0,5	0	0,606
4	-0,25	0	0,428
5	0	0	0,366
6	0,25	0	0,428
7	0,5	0	0,606
8	0,75	0	0,87
9	0,99999	0	1,24

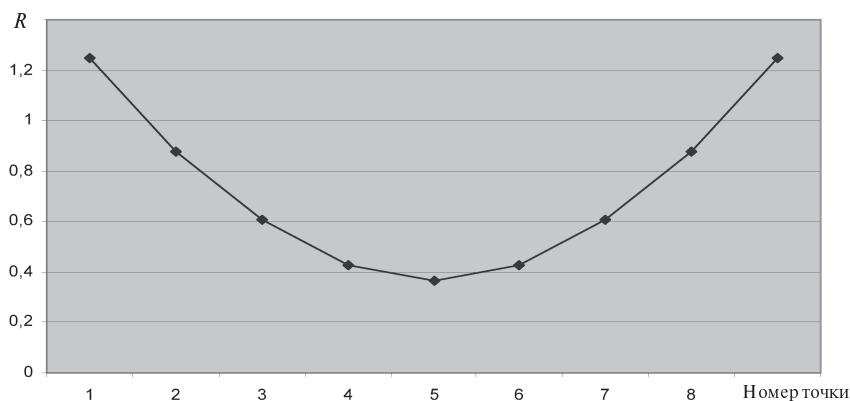


Рис. 2. Силы реакции под квадратным штампом,
нагруженным единичной силой, при движении вдоль оси x

Опыты на плотном песке показывают, что не-реактивное давление у краев штампа всегда равно нулю. Такие эпюры получены и представлены в работах В.Н. Морозова, И.О. Строгова, Ю.Н. Мурзенко и А.П. Криворотова [7, 8, 9]. С представленными выше решениями сравнивать численные результаты сил реакции по краям площадки нагружения будет неправильно. Современные методы МКЭ позволяют приближенно считать эти задачи для штампов небольших размеров. При больших размерах плиты, когда ее площадь может достигать нескольких квадратных километров, расчет вызывает затруднения. Построение полной глобальной картины изменения сил реакции в зависимости от формы и размеров штампа окажется очень трудоемким.

В данном решении размер и форма плиты неограниченны. Функция α является коэффициентом формы и размеров произвольного прямоугольного штампа.

Согласно СНиП напряжения в основании под плитами не должны превышать их упругой работы. На практике под жесткими фундаментными плитами грунт выравнивают достаточно большим слоем песка. Горизонтальное напряжение при такой засыпке под плитой практически равно нулю.

К предложенной методике решения и численным результатам для сравнения подходит работа [3]. Авторы предупреждают, что коэффициенты степенного ряда вычислены приближенно. Однако в работе используется и второе упрощение:



Таблица 2

**Расчет сил реакции $R^r(x, y)$ квадратного штампа,
нагруженного единичной силой,
при движении расчетной точки по диагонали квадрата**

x	y	R	R_1	Номера точек
-0,99999	-0,99999	1,901	2,741	1
-0,75	-0,75	1,298	1,241	2
-0,5	-0,5	0,823	0,747	3
-0,25	-0,25	0,489	0,605	4
0	0	0,366	0,556	5
0,25	0,25	0,489	0,605	6
0,5	0,5	0,823	0,747	7
0,75	0,75	1,298	1,241	8
0,99999	0,99999	1,901	2,741	9

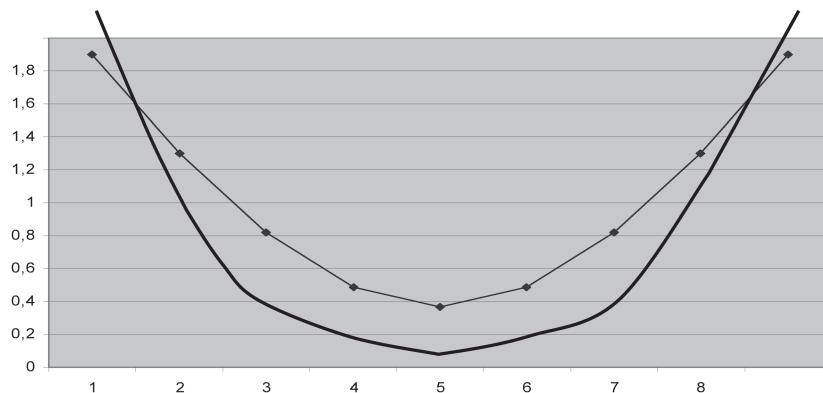
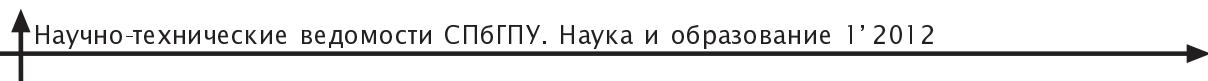


Рис. 3. Силы реакции под квадратным штампом,
нагруженным единичной силой, в точках по диагонали квадрата
(—■— R ; ——— R_1)

не учитывается форма площадки нагружения при вычислении коэффициентов. Расчет десяти коэффициентов степенного ряда произведен только для семи площадок с различными соотношениями сторон. Сравним центральную и угловую точки, где должна быть существенная разница по результатам расчетов. Так, для соотношения $\beta = a/b = 1$ реактивная нагрузка в центре площадки равна $P(x, y) = 0,556 \cdot 1/(2a2b) \text{ т/м}^2$, в угловой точке — $P(x, y) = 2,741 \cdot 1/(2a2b) \text{ т/м}^2$. По формулам, полученным в виде конечного интеграла, имеем в центре $R^r(x, y) = 0,366 \cdot 1/(2a2b) \text{ т/м}^2$, в угловой точке — $R^r(x, y) = 1,90 \cdot 1/(2a2b) \text{ т/м}^2$. Разница есть; нельзя сказать, что она очень большая. Коэффициенты степенного уравнения получены приближенно и только для семи

различных по форме площадок нагружения. Полученную формулу в работе [3] нельзя назвать законченным аналитическим решением.

В отличие от решения Буссинеска для круглого штампа и решений других авторов для прямоугольного штампа, здесь впервые решение получено полуобратным способом. Оно имеет существенное отличие от контактной задачи теории упругости. В сущности, здесь выполнен подбор функции реакции по двум основным условиям — равновесия сил реакции под штампом и одинаковой осадки под ним. Коэффициент α получен в виде конечного интеграла. Это функциональный коэффициент конкретной точки штампа, который учитывает его форму и размеры.



Существенно отличаются и величина сил реакции под прямоугольным штампом при приближении расчетной точки к краям штампа. Величи-

на сил реакции для упругого полупространства не стремится к бесконечности на краях штампа, что существенно ближе к реальности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Филоненко-Бородич, М.М.** Теория упругости. [Текст]: учеб. пособие для техн. вузов / М.М. Филоненко-Бородич.— 3-е изд. М.: Гос. изд-во технико-теор. лит, 1947.— 300.
2. **Фогт, Ф.** О расчете деформации фундаментов [Текст] / Ф. Фогт / ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева.— ОППНТИ НТБ, Перевод № 911. 1973.
3. **Горбунов-Посадов, М.И.** Расчет конструкций на упругом основании [Текст] / М.И. Горбунов-Посадов, Т.А. Маликова, В.И. Соломин // М.: Стройиздат, 1984.
4. **Наумов, И.В.** Упругое полупространство [Текст] / И.В. Наумов // Научно-тех. ведомости СПбГПУ.— 2005. № 4.— С. 84–93.
5. **Абрамов, В.М.** Проблема контакта упругой полуплоскости с абсолютно жестким штампом при учете сил трения [Текст] / В.М. Абрамов // Доклады Академии наук СССР.— 1937. Т. XVII. № 4.— С. 173–178.
6. **Абрамов, В.М.** Исследование случая несимметричного давления штампа круглого сечения на упругое полупространство / В.М. Абрамов // Доклады Академии наук СССР.— 1939.— Т. XVIII.— № 8.— С. 759–763.
7. **Морозов, В.Н.** Контактные напряжения под штампами малого диаметра [Текст] / В.Н. Морозов, И.О. Строг / ЛИСИ // Механика грунтов и фундаментостроение.— 1970. № 61.
8. **Мурзенко, Ю.Н.** Результаты экспериментальных исследований характера распределения нормальных контактных напряжений по подошве жестких фундаментов на песчаном основании [Текст] / Ю.Н. Мурзенко // Основания, фундаменты и механика грунтов.— 1965. № 2.— С. 1–4.
9. **Криворотов, А.П.** Экспериментальное исследование распределения нормальных давлений по контакту штампа с песчанным основанием [Текст] / А.П. Криворотов // Основания, фундаменты и механика грунтов.— 1963. № 2.
10. **Штаерман, И.Я.** Распределение давления под фундаментами при наличии пластической зоны [Текст] / И.Я. Штаерман // Тр. МИСИ им. В.В. Куйбышева.— 1956. № 14.
11. **Наумов, И.В.** Определение напряженно деформированного состояния упругого полупространства от нагружения произвольной нагрузкой [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук / И.В. Наумов / СПбГПУ. 2009.
12. **Наумов, И.В.** Средняя осадка упругого полупространства под прямоугольной областью нагружения [Текст] / И.В. Наумов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2009. № 4. Т. 2(89).

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 628.511

P.P. Усманова

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ

Бурное развитие промышленности привело к серьезному ухудшению экологической обстановки.

Одна из острейших проблем — загрязнение воздушного бассейна газовыми выбросами промышленных предприятий. Проблема очистки газовых выбросов от мелкодисперсной пыли является одной из актуальных в газоочистке и давно выдвинута на первый план экспериментальных и теоретических исследований.

Один из наиболее перспективных методов повышения эффективности пылеулавливания — мокрая очистка. Этот метод более сложный и дорогостоящий по сравнению с сухой очисткой, но и более эффективный. Процесс мокрой очистки газа может быть реализован в аппаратах центробежного типа.

Для центробежных аппаратов характерны высокая эффективность, простота конструкции и низкая металлоемкость. Применение данного типа оборудования позволяет также существенно интенсифицировать процесс массообмена за счет увеличения скорости движения фаз.

В настоящее время центробежные аппараты начинают активно внедрять в производство самых разнообразных химических продуктов, в металлургии, а также для решения экологических проблем.

Для очистки и охлаждения дымовых газов, отходящих от печей обжига шихтовально-печного цеха, применяется барботажно-вихревой аппарат с осевым оросителем [1]. Аппарат установлен в ОАО «Сода» (г. Стерлитамак). Аппарат для мокрой очистки газа (рис. 1) содержит циклон 1, цилиндрическую камеру 2 с входной трубой 3, трубу перетока шлама 4 в шламосборник 5.

Цилиндрическая камера снабжена осевым оросителем 6, перфорированным по всей длине отверстиями для подачи орошающей жидкости. В цилиндрической камере установлен завихритель 7 газового потока в виде четырех лопастей, жестко скрепленных с оросителем 6. Крепление цилиндрической камеры осуществляется с помощью фланцев 8, благодаря чему барботажно-вихревой аппарат может устанавливаться в газоходах пылеулавливающей системы с целью экономии материальных средств и площади производственных помещений.

При установке аппарата в качестве предварительной ступени очистки на газоходе предусматривают заглушки. Внедрение такой системы газоочистки позволило повысить эффективность пылеулавливания с 53 до 95 % по сравнению с использованием только циклона сухой очистки. Срок окупаемости капитальных затрат

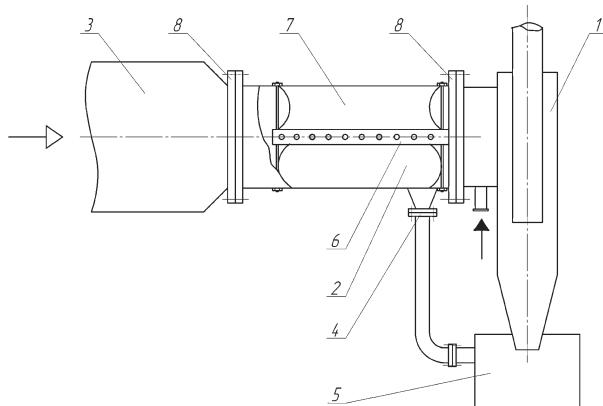


Рис. 1. Барботажно-вихревой аппарат с осевым оросителем:

1 — циклон; 2 — цилиндрическая камера; 3 — входная труба; 4 — сток шлама; 5 — шламосборник; 6 — осевой ороситель; 7 — завихритель; 8 — фланцы

на внедрение барботажно-вихревого аппарата с осевым оросителем составляет менее трех месяцев при монтаже аппарата в газоходе пылеулавливающей системы.

Для очистки газов с начальной концентрацией пыли до $50 \text{ г}/\text{м}^3$ при размерах частиц более 2 мкм рекомендуется применять пылеуловители ударно-инерционного действия. К таким аппаратам можно отнести ротоклон с регулируемыми лопастями [2].

Ротоклон (рис. 2) имеет несколько щелевых каналов, образуемых верхними 1 и нижними 2 лопастями. Запыленный газ поступает во входной патрубок 3 в верхней части аппарата. Ударясь о поверхность жидкости, он меняет свое направление и проходит в щелевой канал, образованный лопастями. Благодаря высокой скорости движения, очищаемый газ захватывает верхний слой жидкости и дробит его на капли и пену. После последовательного прохождения всех щелевых каналов газ проходит каплеуловитель 4 и через выходной патрубок 5 удаляется в атмосферу. Уловленная пыль оседает в бункере и периодически выводится из аппарата. Оптимальный режим пылеулавливания обеспечивается регулированием положения нижних лопас-

тей относительно верхних, что позволяет повысить эффективность газоочистки в широком диапазоне запыленности газового потока.

Были проведены исследования такого ротоклона, установленного для улавливания пыли барита из дымовых газов шихтовально-печного цеха.

Ротоклон имел три щелевых канала, скорость газа в которых составляла $23 \text{ м}/\text{с}$; при этом гидравлическое сопротивление не превышало 1000 Па . Работая в таком режиме, ротоклон обеспечивал эффективность улавливания пыли с входной концентрацией $0,32 \text{ г}/\text{м}^3$ на уровне $93,5 \%$.

Ротоклон показал себя достаточно надежным в эксплуатации. Уровень жидкости устойчиво поддерживается регулятором уровня. Однако система вывода шлама требует доработки для замены ручной периодической выгрузки на автоматизированную.

Барботажно-вихревой аппарат для очистки технологических газов применяется там, где требуется установить низконапорные пылеуловители мокрого типа [3].

Аппарат содержит цилиндрическую камеру, в которой установлен завихритель газового потока, представляющий пару пересекающихся плоскостей, образующих четыре лопасти, формирующие проточные секции. В аппарате перед завихрителем установлена центральная форсунка, а в каждой проточной секции после завихрителя — периферийные форсунки. Опытно-промышленные испытания аппарата были проведены на ЗАО «Каустик» (г. Стерлитамак), на линии очистки дымовых газов.

Согласно разработанной технологической схеме (рис. 3), отходящие от печи обжига 1 газы (производительность $15000\text{--}28000 \text{ м}^3/\text{ч}$) при температуре 560°C поступают в барботажно-вихревой аппарат 2. Сюда же на орошение подается $1\text{--}3 \%$ -й раствор известкового молока ($\text{pH} = 11,5\text{--}12,5$). Отделившийся шлам поступает в барабан-гаситель 3. Осветление и охлаждение известкового молока происходит в фильтре-отстойнике 4, из которого оно вновь подается на орошение. Очищенный газ дымососом 7 выбрасывается в атмосферу.

Исследования показали, что допустимое остаточное содержание пыли в газах ($200 \text{ мг}/\text{м}^3$) обеспечивается при гидравлическом сопротивлении аппарата около 400 Па . Газ охлаждается до 65°C .

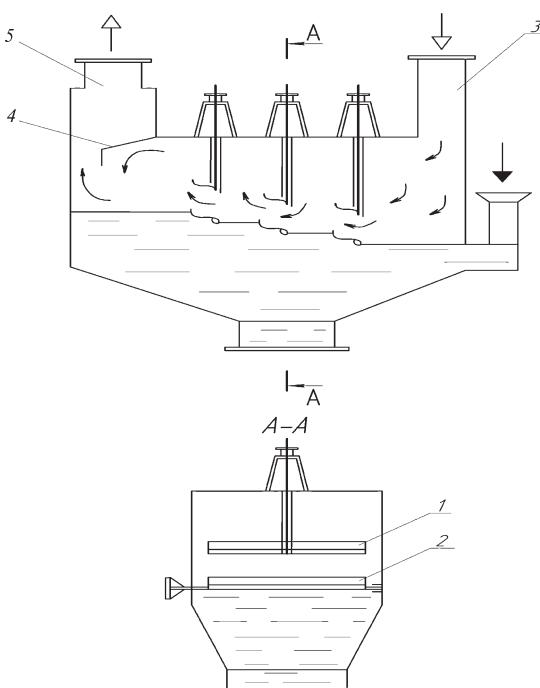


Рис. 2. Ротоклон с регулируемыми лопастями:
1 — верхние лопасти; 2 — нижние лопасти; 3 — входной патрубок; 4 — каплеуловитель; 5 — выходной патрубок

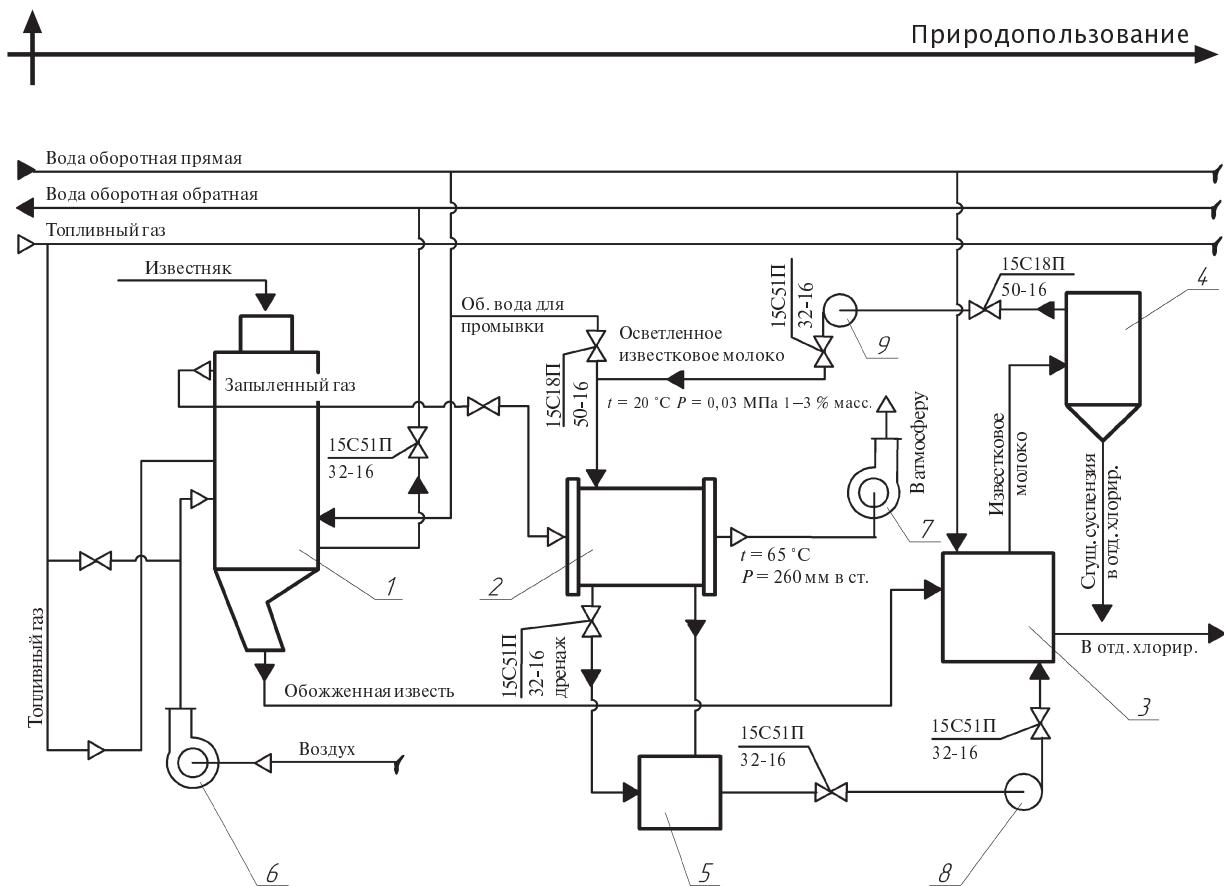


Рис. 3. Технологическая схема очистки дымовых газов печи обжига:

1 — печь обжига; 2 — барботажно-вихревой аппарат; 3 — барабан-гаситель; 4 — фильтр-отстойник; 5 — емкость;
6, 7 — вентиляторы; 8 — насос

Барботажно-вихревой аппарат работает без стока, так как вся рециркулируемая в системе жидкость используется в технологическом процессе.

Магнитный гидроуловитель предназначен для очистки промышленных газов от ферромагнитных частиц [4]. Такое устройство содержит корпус, в нижней части заполненный жидкостью, с патрубком ввода газа 1, снабженным конфузором 2, концентрическо которому установлен диффузор 3. При этом с внешней стороны корпуса размещена электромагнитная система 4, представляющая собой магнитные катушки с обмоткой. С внутренней стороны корпуса установлено ограничительное кольцо 5, препятствующее растеканию магнитной жидкости 6, залитой внутрь корпуса (рис. 4).

Повышение эффективности пылеулавливания обусловлено действием на поток двух сил: силы инерции, возникающей при поступательном движении газового потока, и центробежной силы, возникающей при вращении потока в магнитном поле.

Работа такой магнитной системы обеспечивает оптимальную эффективность пылеулавли-

вания (95–98,5 %) при колебаниях давления пылевоздушного потока.

Особенно важно, что такой гидроуловитель эффективно улавливает тонкодисперсные частицы, наиболее опасные для здоровья человека.

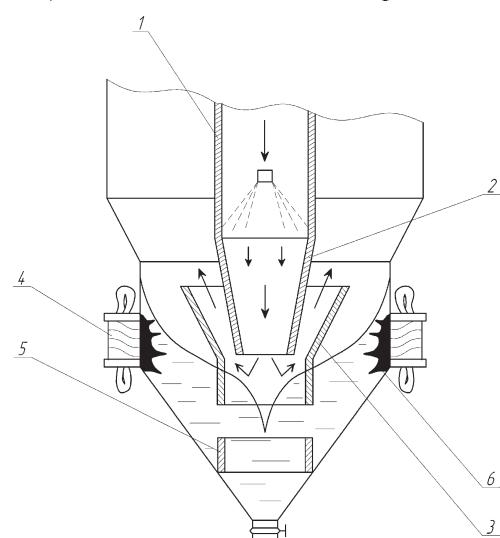


Рис. 4. Магнитный гидроуловитель:
1 — входной патрубок; 2 — конфузор; 3 — диффузор;
4 — электромагнитная система; 5 — ограничительное
кольцо; 6 — магнитная жидкость

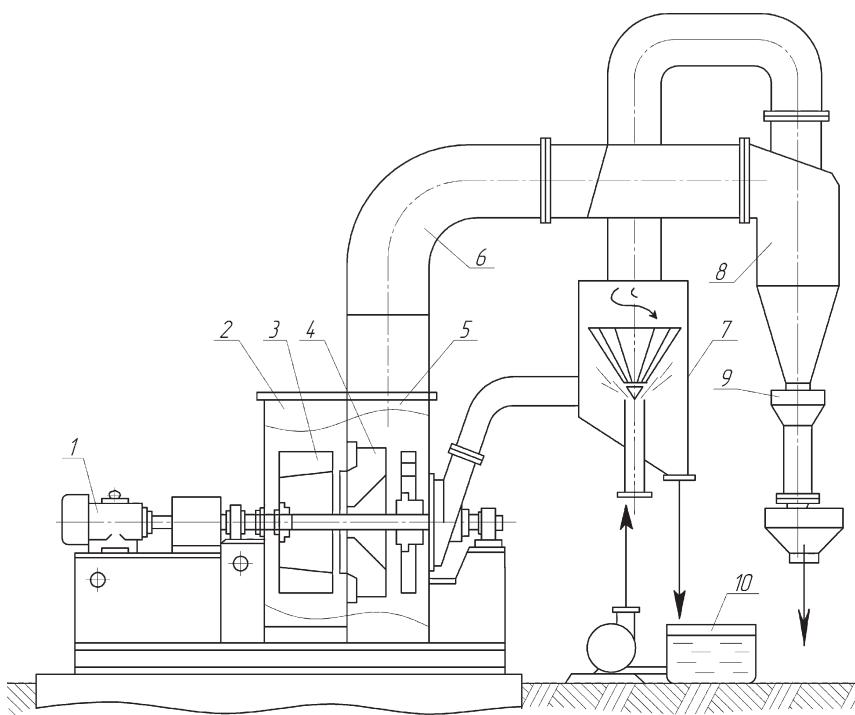


Рис. 5. Установка для очистки воздуха от пыли:

1 — электродвигатель; 2 — вентилятор; 3 — рабочее колесо; 4 — направляющий аппарат; 5 — пылеуловитель; 6 — воздуховод; 7 — динамический газопромыватель; 8 — циклон; 9 — бункер для пыли; 10 — отстойник

В литейном цехе ОАО «Станкостроительный завод» (г. Стерлитамак) один из наиболее вредных производственных факторов — повышенная запыленность воздуха. В связи с непрерывным ростом производственных мощностей увеличивается поступление пыли в рабочую зону при изготовлении формовочных смесей, выбивке и очистке отливок.

Для очистки воздуха, отходящего от дробеметной камеры, в качестве второй (мокрой) ступени очистки после сухого циклона используется динамический газопромыватель [5].

Установка состоит из электродвигателя 1, рабочего колеса 3, двух улиток 2 и 5, направляющего аппарата 4, воздуховодов 6 (для отвода пыли и возврата воздуха), циклона 8, динамического газопромывателя 7, бункера для пыли 9 и отстойника 10 (рис. 5).

Требуемая степень очистки достигается изменением скорости газа в зоне промывки его факелом распыляемой жидкости на второй (мокрой) ступени пылеулавливания. Орошающая жидкость поступает в устройство по осевому патрубку в виде плоских радиальных струй, что обу-

словливает интенсивный контакт фаз. Воздух поступает из первой ступени очистки в аппарат по тангенциальному патрубку и начинает вращаться в поле центробежных сил.

Орошающая жидкость циркулирует через отстойник по замкнутому контуру и при достижении требуемой концентрации уловленной пыли с помощью насоса вновь подается на орошение.

Эффективность очистки воздуха от пыли (средний размер 160 мкм) с помощью такой установки возросла с 63 до 98 %. Срок окупаемости капитальных затрат на внедрение динамического газопромывателя составляет менее 1,5 года.

Применение подобной установки в отделении очистки отливок показало ее надежность, позволило снизить концентрацию пыли в атмосферном воздухе.

Анализ показателей работы очистного оборудования различного типа показал, что для очистки газов, выбрасываемых промышленными предприятиями в атмосферу, наиболее перспективны мокрые пылеуловители центробежного действия.



На основании результатов проведенных исследований были рассчитаны и спроектированы установки очистки промышленных выбросов от газообразных и твердых примесей.

Посредством промышленных внедрений подтверждены высокие технико-эксплуатационные показатели разработанных аппаратов для очистки промышленных выбросов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент 2182843 РФ. МПК. кл. В-04 С/02.

Барботажно-вихревой аппарат с осевым оросителем [Текст] / Р.Р. Усманова, В.М. Титов, А.К. Панов.— Опубл. 27.05.2002.— Бюл. № 15.

2. Патент 2317845 РФ. МПК, кл. В-04 С/02.

Ротоклон с регулируемыми синусоидальными лопастями [Текст] /Р.Р. Усманова, А.К. Панов, В.С. Жернаков.— Опубл. 27.02.2008.— Бюл. № 6.

3. Патент № 2234358 РФ. МПК, кл.В-04 С/02.

Барботажно-вихревой аппарат [Текст] / Р.Р. Усманова, А.К. Панов.— Опубл. 20.08.2004.— Бюл. № 23.

4. Заявка на изобретение 2007120000 РФ МПК.

кл. В01 Д47/06. Магнитный гидроуловитель [Текст] / Р.Р. Усманова.— Опубл. 29.05.2007.

5. Патент 2339435 РФ. МПК. кл. В01 Д47/06.

Динамический газопромыватель [Текст] / Р.Р. Усманова.— Опубл. 27.11.2008.— Бюл. № 33.

УДК 620.952:543.3:543.426

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

СПЕКТРОФЛУОРИМЕТРИЯ В ИЗУЧЕНИИ ДИНАМИКИ РАЗЛОЖЕНИЯ БИООРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Эффективность использования возобновляемых источников энергии (бытовой мусор, отходы сельскохозяйственного производства и т. п.) для производства биогаза напрямую зависит от создания оптимальных условий процесса биодеградации сырья. Оптимальные условия определяются способом предварительной обработки сырья (механическое измельчение, ультразвуковое воздействие, ферментативное разложение), параметрами среды (влажность, температура, величина pH на каждой стадии процесса), наличием необходимых добавок и т. д. [1].

Как известно, основной компонент биогаза — метан — образуется в анаэробных условиях в результате последовательного протекания четырех стадий — гидролиза сырья, ацидогенеза, ацетогенеза, активного метаногенеза [2]. На первых стадиях из сложных органических соединений (жиры, белки, углеводы), находящихся в составе отходов, образуются более простые вещества, которые легче переходят в состав водной фазы, — жирные кислоты, глицерин, аминокислоты, простые сахара, затем ацетаты, бутираты, пропионаты, этанол и др. На ацетогенной стадии летучие

жирные кислоты (ЛЖК), аминокислоты и спирты двумя группами ацетогенных бактерий превращаются в уксусную кислоту, углекислый газ, водород и воду. На метаногенной стадии, осуществляемой медленно растущими бактериями, которые относятся к строгим анаэробам, происходит образование метана либо путем расщепления ацетата на метан и углекислый газ (72 %), либо путем восстановления диоксида углерода до метана и воды (28 %).

В то же время более простые молекулы (аминокислоты, олиго- и моносахариды и др.), образующиеся на стадии гидролиза и последующих, могут вовлекаться и в процессы образования гуминовых веществ [3]. Так, целлюлоза и ее производные с помощью ферментов гидролизуются с образованием D-глюкозы, ди-, три сахаров и впоследствии входят в состав гуминовых кислот [4].

Таким образом, на разных стадиях процесса образования метана формируются водорастворимые компоненты, которые могут быть реагентами эффективности протекания процесса в целом.

Цель нашей работы состояла в выявлении возможности применения метода спектрофлуориметрии для оценки эффективности протекания процесса анаэробного разложения органических отходов путем анализа образующихся водорастворимых аминокислотных и гуминовых компонентов.

Объектом исследования служила модельная смесь, соединенная с компостом, полученным на заводе механической переработки бытовых отходов (МПБО). Модельная смесь состояла из быстро-, средне- и медленноразлагаемых компонентов (20 % пищевых отходов, 15 % навоза, 7 % бумаги, 15 % парковых отходов), а также условнобиодеградируемых и небиодеградируемых (3 % пластмассы, 31 % песка и камней).

Система № 1, контрольная, на 100 % состояла из компоста. В системе № 2 массовое отношение модельной смеси и компоста составляло 7 : 3; в системе № 3 — 1 : 1. После добавления ко всем системам одинакового объема дехлорированной водопроводной воды они были помещены в термобокс, температуру в котором поддерживали на уровне $36,0 \pm 0,5$ °C.

Для определения эффективности разложения отходов постоянно регистрировали объем выделившегося биогаза, еженедельно проводили отбор и анализ проб биогаза и фильтрата. В биогазе определяли концентрацию метана и углекислого газа, а в фильтрате — химическое потребление кислорода (ХПК), биохимическое потребление кислорода за 5 суток (БПК₅), pH, электропроводность, щелочность.

Получение спектров флуоресценции компонентов фильтратов проводили после их разведения дистиллированной водой (в 100 раз) на приборе «Флюорат-02-Панорама» производства фирмы Люмэкс (Россия) [5]. При обработке данных проводили полную коррекцию, предусмотренную программным обеспечением установки Флюорат-02-Панорама, а также коррекцию на «вторичный внутренний фильтр», т. е. на светопоглощение люминесцентного излучения на его пути к фотоприемнику (ФЭУ) [6].

Из научных публикаций известно, что в нейтральном водном растворе максимумы полос люминесценции входящих в состав белков (аминокислоты) бензольного, фенольного и индолинового люминофоров приходятся соответственно на 275–282, 303–304 и 307–353 нм; максимумы основных полос возбуждения люминесценции

этих люминофоров — на длины волн 257 нм (бензольный люминофор), 220 и 275–280 нм (фенольный и индолиновый люминофоры) [7]. Низкий коэффициент поглощения и низкий квантовый выход флуоресценции бензольного люминофора делает его вклад в люминесценцию белков несущественным, поэтому далее он не будет приниматься во внимание.

Из литературных данных также следует, что при возбуждении люминесценции соединений гуминового типа электромагнитным излучением с длинами волн 200–350 нм максимум полосы регистрации люминесценции наблюдается при длинах волн 410–450 нм; при больших длинах волн возбуждения полоса регистрации люминесценции сдвигается в длинноволновую область [8, 9]. В наших предыдущих исследованиях [10] названные закономерности подтверждены для природных и питьевых вод.

На рис. 1, *a*–*в* представлено по пять (из 14-ти) спектров люминесценции фильтратов, полученных в контрольном опыте (№ 1), а также на разных сроках разложения смеси компоста и отходов в системах № № 2 и 3. Спектры получены при длине волны возбуждения $\lambda_{возб} = 230$ нм.

Как видно из рис. 1, на всех спектрах присутствуют полосы рассеяния света на взвешенных примесях (максимальные значения интенсивности сигнала совпадают с длиной волны возбуждения $\lambda = 230$ нм, а также с удвоенной длиной волны возбуждения $\lambda = 460$ нм, соответствующей второму порядку дифракции). Кроме того, на плечах данных полос ($\lambda > \lambda_{max}$) наблюдаются (в виде ступенек) полосы комбинационного рассеяния света на молекулах воды. Их положение соответствуют частотному сдвигу, равному $0,34 \cdot 10^4$ см⁻¹. В средней части спектров регистрируются полосы люминесценции белкового и гуминового типа с максимумами соответственно при 300, 330–340 и 420–430 нм.

Анализ полученных спектров (см. рис. 1) показал, что в первой (контрольной) системе за время наблюдения не происходило существенных изменений. Это можно объяснить тем, что основная доля отходов, из которых получен компост, ранее уже была подвергнута биоразложению в аэробных условиях. В системе № 2 отмечено преобладание вклада интенсивности люминесценции фенольного люминофора ($\lambda_{max} \approx 300$ нм) примерно до шестидесятых суток с момента приготовления смеси, в системе № 3 — в более ко-

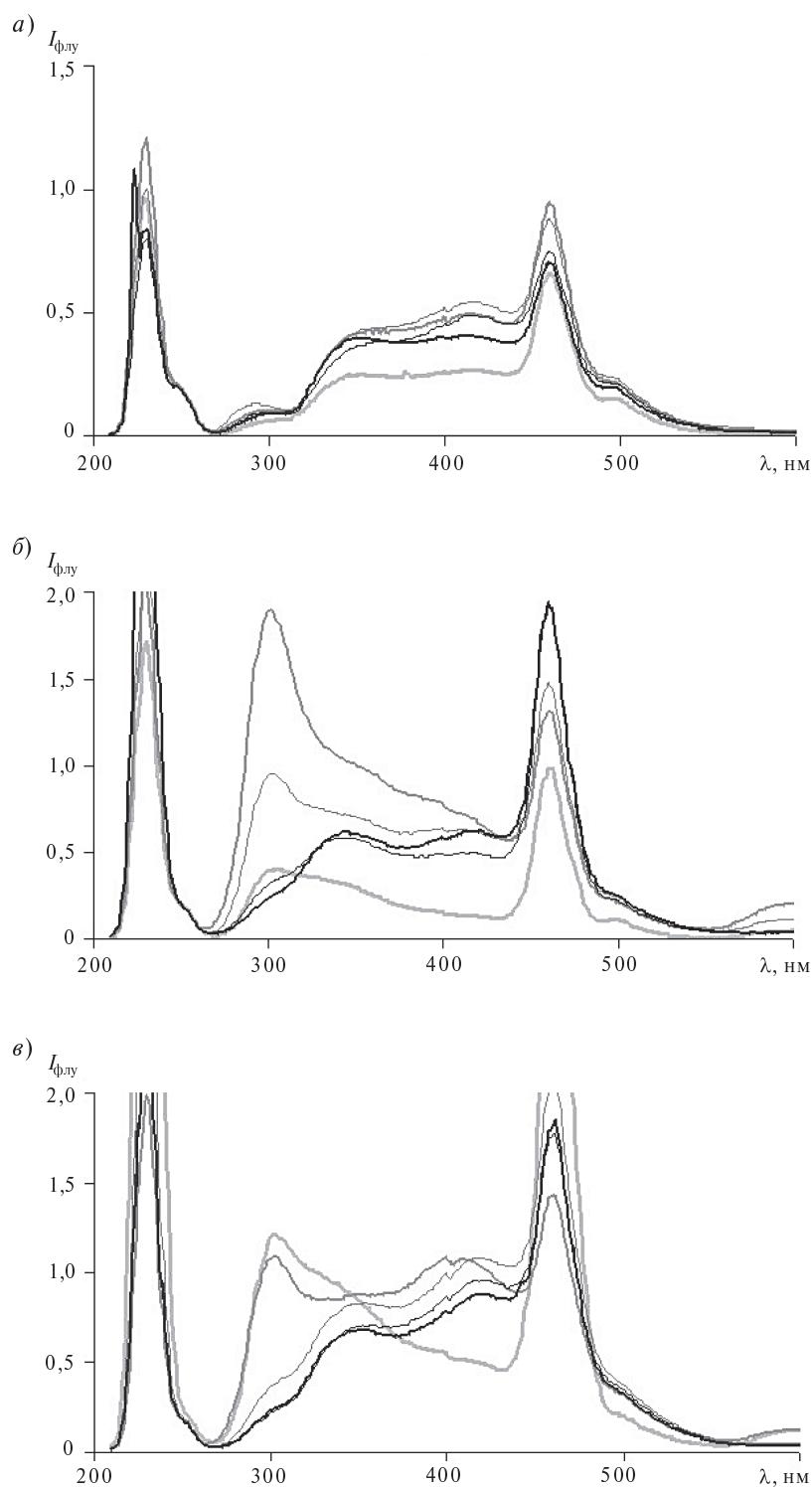


Рис. 1. Спектры люминесценции фильтратов, полученных в контролльном опыте (а), а также на разных сроках разложения смеси отходов и компоста в соотношении 7 : 3 (б) и 1 : 1 (в); $\lambda_{\text{возб}} = 230 \text{ нм}$

— 11 сут.; — 33 сут.; — 59 сут.; — 73 сут.; — 108 сут.

роткий период (менее 40 суток). Впоследствии происходило заметное снижение интенсивности данного люминофора и увеличение вклада интенсивности люминесценции гуминового типа.

Для удобства интерпретации экспериментальные данные были представлены в виде зависимостей максимальной интенсивности сигнала (нормированной на единицу массы сухих отходов) в полосах люминесценции белкового и гуминового типа от времени биодеградации отходов. Сравнение полученных зависимостей с кинетическими кривыми эмиссии метана показало, что только для фенольного люминофора обнаруживается корреляция с кривыми эмиссии метана (рис. 2).

Как видно из рис. 2, в системе № 1 отсутствовала эмиссия метана, при этом интенсивность сигнала для фенольного люминофора также была близкой к нулю. В системах № 2 и № 3 основная эмиссия метана наблюдалась после того, как интенсивность фенольного люминофора достигала максимума, а ее снижение соответствовало существенному уменьшению сигнала $I_{\text{флу}}$. По-видимому, отмеченные периоды соответствуют времени биодеградации быстроразлагающихся биоорганических отходов. В дальнейшем также зарегистрирована эмиссия метана, которой на рис. 2 соответствовали ненулевые значения $I_{\text{флу}}$. Эта область, видимо, связана с биодеградацией среднеразлагаемых отходов.

По данным определения БПК, ХПК, удельной электропроводности, pH были также построены зависимости значений каждого показателя (нормированные на единицу массы отходов) от времени биодеградации отходов. Полученные кривые приведены на рис. 3, *a–в* и 4.

Анализ кривых, приведенных на рис. 3, показывает, что в первой системе значения БПК₅ и ХПК фильтратов ничтожно малы по сравнению с биохимическим и химическим потреблением кислорода в системах № 2 и № 3. Это хорошо согласуется с различием в эмиссии метана в системах, а также сигналом флуоресценции фенольного люминофора (рис. 2).

Для второй системы зависимости БПК₅ и ХПК от времени биодеградации отходов напоминает по форме, а также границам подъема и спуска кривых положение и поведение кривой интенсивности фенольного люминофора.

Для третьей системы наблюдается в целом аналогичное сходство (за исключением начальных участков кривых). Кроме того, для систем № 2 и № 3 в первом приближении оказывается равным отношение высот пиков на кривых интенсивности фенольного люминофора, с одной стороны, БПК₅ и ХПК, с другой. Проведенное сравнение позволяет предположить положительную корреляцию между значениями интенсивности фенольного люминофора и величинами БПК₅ и ХПК.

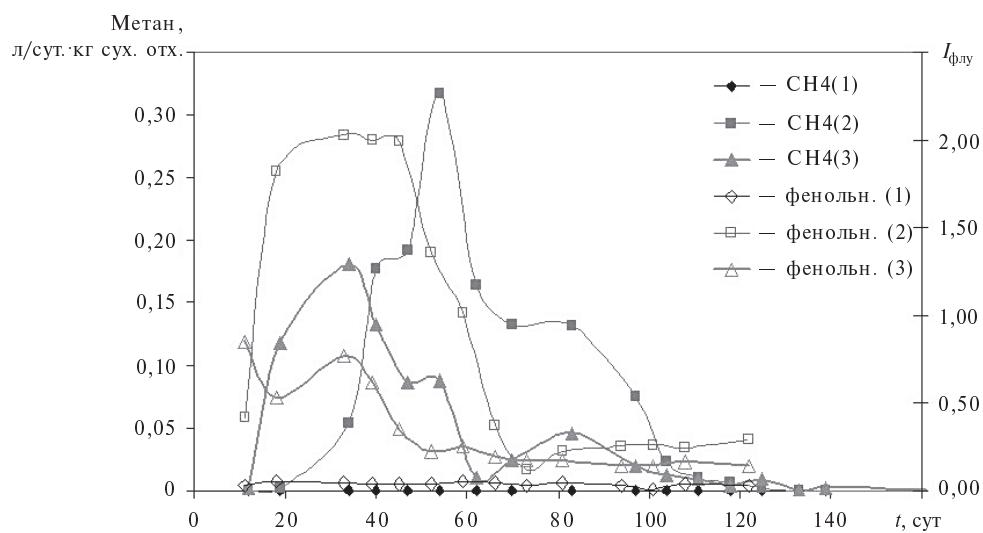


Рис. 2. Сравнение интенсивности сигнала в полосе люминесценции фенольного люминофора (при $\lambda_{\text{max}} \approx 300$ нм, $\lambda_{\text{возб}} = 230$ нм) с суточной эмиссией метана в трех системах (№№ 1–3)

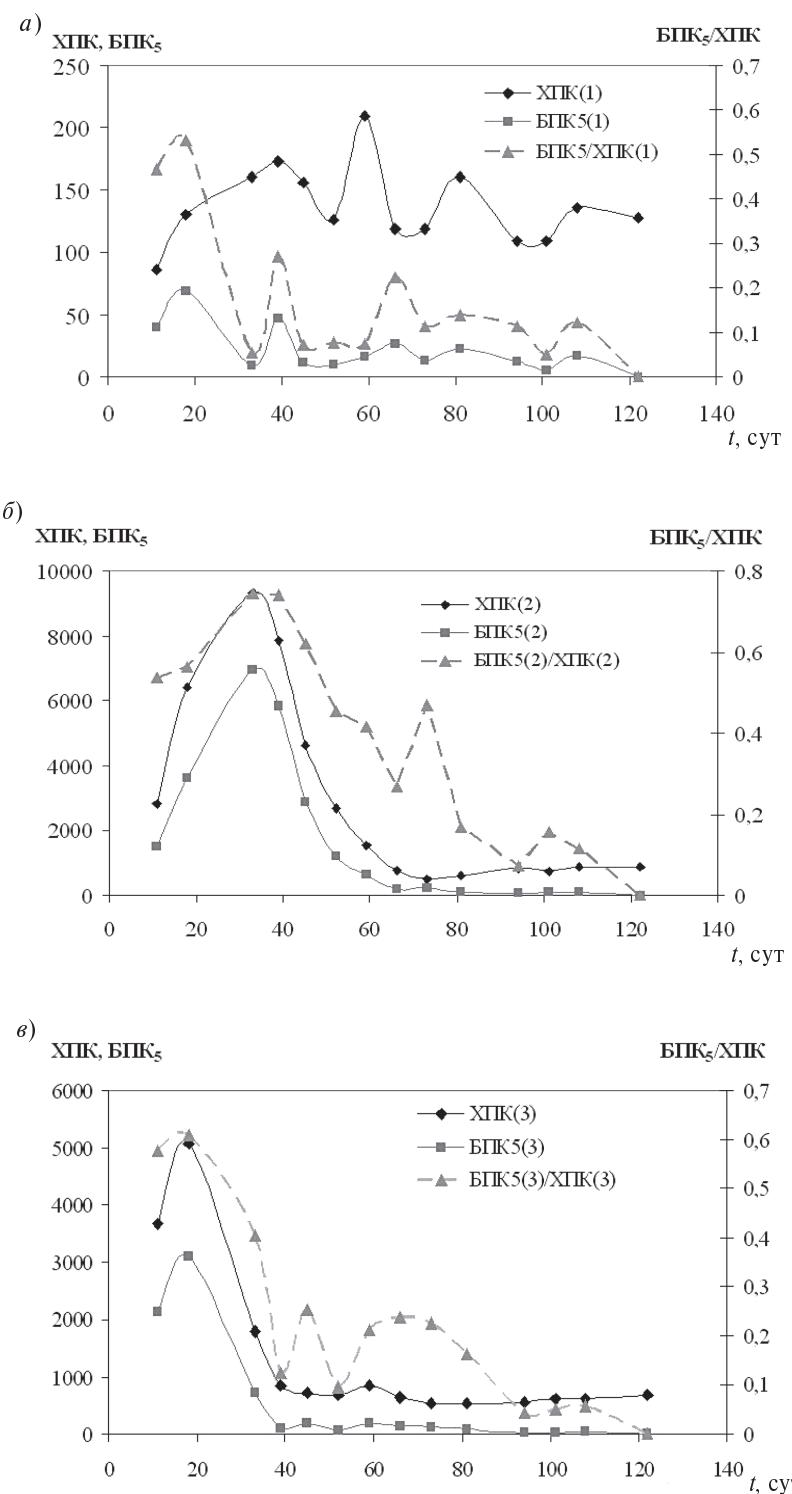


Рис. 3. Зависимости биохимического (БПК₅), химического (ХПК) потребления кислорода, а также их отношения от времени биодеградации отходов в системах № 1 (*а*), 2 (*б*) и 3 (*в*)

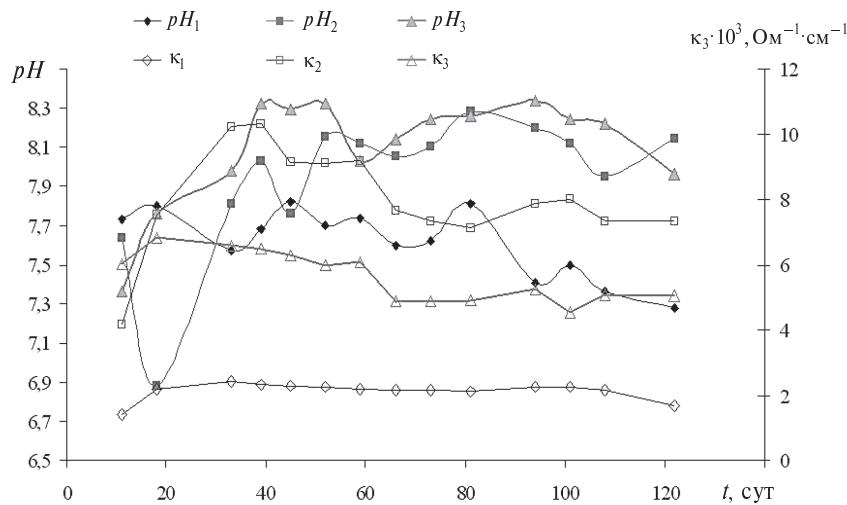


Рис. 4. Зависимости pH и удельной электропроводности (κ) фильтратов систем №№ 1, 2, 3 от времени биодеградации отходов

Отношение показателя биологического потребления кислорода к показателю химического потребления кислорода является важной величиной, отражающей количество органических (и некоторых неорганических) веществ, которые можно разложить биохимическим путем (с помощью микроорганизмов). Обычно эту величину используют для оценки эффективности процесса биодеградации отходов. Как показали результаты дополнительных вычислений, зависимости отношения БПК₅ / ХПК фильтратов от времени биодеградации отходов во второй и третьей системах, приведенные на рис. 3, б, в, в первом приближении отражают суммарные зависимости суточной эмиссии метана и интенсивности флуоресценции фенольного люминофора, приведенные к безразмерному виду (нормированные на максимальные значения).

Анализ кривых, приведенных на рис. 4, показал слабую зависимость pH и удельной электропроводности фильтрата первой системы от времени. Это еще раз подтверждает отсутствие протекания заметных процессов биодеградации в системе № 1. Снижение величины pH во второй и третьей системах в начальный период отражает протекание ацидогенной стадии анаэробной биодеградации отходов. Дальнейшее повышение pH в обеих системах подтверждает наличие условий (по кислотности среды) для эффективного протекания процесса метаногенеза.

Зависимости удельной электропроводности фильтратов от времени во второй и третьей сис-

темах, а именно первоначальное повышение и последующее снижение значений, также не противоречат представлениям о протекании процесса биодеградации отходов, при котором в результате гидролиза и ацидогенеза возрастает количество органических ионов, а затем при метаногенезе ацетат-ион расходуется на получение метана.

При сравнении рис. 4 и 2 также видно, что зависимости pH и удельной электропроводности от времени имеют вид, отличный от кривых эмиссии метана или от зависимостей интенсивности люминесценции фенольного люминофора от времени.

Для количественного сравнения полученных в работе зависимостей от времени разных параметров трех систем проведен корреляционный анализ пар разных показателей, результаты которого представлены в табл. 1 и 2.

Известно, что корреляция считается сильной, если ее коэффициент выше 0,60; если же он превышает 0,90, то корреляция считается очень сильной [11]. В табл. 1 и 2 значения коэффициента, превышающие 0,6, выделены для удобства анализа жирным шрифтом.

Как видно из табл. 1, только два значения коэффициента корреляции превышают величину 0,6. При этом трудно объяснить, почему показатель БПК₅/ХПК коррелирует с эмиссией метана для второй системы и не коррелирует для третьей, а также почему показатель удельной электропроводности коррелирует с эмиссией



Таблица 1

**Коэффициенты корреляции между величинами эмиссии метана
и разными показателями проб фильтратов трех систем**

Показатель	Значения показателя в трех системах		
	1	2	3
ХПК	0,21	-0,05	0,26
БПК _s	-0,19	-0,03	0,22
БПК _s /ХПК	-0,20	0,77	0,31
$I_{\text{флу}}$ фенольного люминофора	0,15	0,26	0,56
$I_{\text{флу}}$ индолльного люминофора	0,18	0,15	0,42
$I_{\text{флу}}$ люминофора гуминового типа	0,11	0,47	0,35
HCO_3^-	-0,07	0,36	0,61
Удельная электропроводность	0,32	0,52	0,78
pH	-0,08	0,43	0,11

Таблица 2

**Коэффициенты корреляции между значениями интенсивности люминесценции
трех люминофоров и разными показателями проб фильтратов трех систем**

Номер системы	Коэффициенты корреляции для трех люминофоров		
	фенольный	индолльный	гуминового типа
<i>Сравнение с величиной ХПК</i>			
1	0,62	0,45	0,42
2	0,90	0,81	0,35
3	0,67	-0,0004	-0,64
<i>Сравнение с величиной БПК_s</i>			
1	0,42	-0,68	-0,75
2	0,87	0,78	0,35
3	0,63	0,11	-0,77
<i>Сравнение с отношением БПК_s/ХПК</i>			
1	0,23	-0,79	-0,86
2	0,83	0,78	0,21
3	0,74	0,13	-0,67
<i>Сравнение с концентрацией бикарбонат-иона</i>			
1	-0,40	0,05	0,09
2	-0,01	0,16	0,62
3	-0,04	0,23	0,68
<i>Сравнение с величиной удельной электропроводности</i>			
1	0,25	0,62	0,09
2	0,67	0,76	0,88
3	0,76	0,49	0,01
<i>Сравнение с величиной pH</i>			
1	0,44	-0,21	-0,10
2	-0,49	-0,47	0,11
3	-0,65	-0,13	0,75

метана для третьей системы, но не коррелирует для второй. Отсутствие какой-либо корреляции для первой системы вполне объяснимо тем, что в первой системе эмиссия метана практически не наблюдалась.

В целом результаты табл. 1 можно объяснить тем, что для второй и третьей систем кривые эмиссии метана смешены по отношению к зависимостям от времени для ХПК, БПК₅, БПК₅/ХПК, а также интенсивности люминесценции фенольного люминофора. Поэтому трудно было ожидать высоких значений корреляции эмиссии метана с этими показателями в одни и те же сроки биодеградации отходов.

По результатам, приведенным в табл. 2, для систем № 2 и № 3 видна отчетливая корреляция между интенсивностью люминесценции фенольного люминофора и показателями, характеризующими наличие химически и биохимически окисляемых органических компонентов, а также величиной удельной электропроводности. Для системы № 2 также прослеживается сравнительно высокая положительная корреляция между интенсивностью люминесценции индольного

люминофора и теми же показателями. Однако при этом трудно объяснить полное отсутствие такой корреляции для системы № 3.

Из табл. 2 также видно, что для люминесценции гуминового типа проявилась положительная корреляция интенсивности сигнала с концентрацией бикарбонат-иона. Однако при сравнении графических зависимостей видно, что в пределах длительных промежутков времени (до 90 %) оба показателя менялись незначительно по сравнению с зависимостями от времени интенсивности фенольного люминофора, концентрации метана, ХПК и БПК₅ для второй и третьей систем.

Таким образом, проведенные исследования показали, что динамику биодеградации бытовых и растительных отходов можно изучать методом спектрофлуориметрии с применением анализатора Флюорат-02-Панорама. Наиболее информативный показатель, коррелирующий с величинами ХПК, БПК₅, БПК₅/ХПК, — интенсивность люминесценции фенольного люминофора, которую следует определять при длине волн возбуждения 230 нм и длине волны регистрации 300 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Молодкина, Л.М. Влияние ультразвукового и ферментативного воздействия на биодеструкцию средне- и медленноразлагаемых отходов [Текст] / Л.М. Молодкина, М.Ю. Андрианова, А.Н. Чусов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— Сер.: Наука и образование.— 2010. № 2 (100).— С. 44–50.
2. Яковлев, С.В. Водоотведение и очистка сточных вод [Текст] / С.В. Яковлев, Ю.В. Воронов.— М.: АСВ, 2002.— 704 с.
3. Орлов, Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации [Текст] / Д.С. Орлов.— М.: Изд-во МГУ, 1990.— 325 с.
4. Щур, А.М. Высокомолекулярные соединения [Текст] / А.М. Щур.— М., 1981.— 655 с.
5. Анализаторы жидкостного типа «Флюорат — 02». Модификация «Флюорат-02-Панорама» [Текст]: Руководство по эксплуатации 230.00.00.00.00 РЭ.— СПб.: «ЛЮМЭКС», 2002.— 37 с.
6. Андрианова, М.Ю. Флюорат-02-Панорама в исследовании водных природно-технических систем [Текст] / М.Ю. Андрианова, Л.М. Молодкина, В.М. Данилов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2007. № 1.— С. 141–148.
7. Пермяков, Е.А. Метод собственной люминесценции белка [Текст] / Е.А. Пермяков.— М.: Наука, 2003.— 189 с.
8. Карабашев, Г.С. О соотношении флюоресценции и концентрации РОВ в водах океана [Текст] / Г.С. Карабашев, А.И. Агатов // Океанология.— 1984. Т. 24.— Вып. 6.— С. 906–909.
9. Westerhoff, P. Fluorescence analysis of standard fulvic acid and tertiary treated wastewater [Текст] / P. Westerhoff, W. Chen, M. Esparza // J. of Environmental quality.— 2001. Vol. 30.— Р. 2037–2046.
10. Андрианова, М.Ю. Спектрофлуориметрический анализ природных и питьевых вод [Текст] / М.Ю. Андрианова, Л.М. Молодкина, В.М. Данилов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2007. № 1.— С. 141–148.
11. Лакин, Г.Ф. Биометрия [Текст]: Учеб. пособие для биол. спец. вузов / Г.Ф. Лакин.— 4-е изд, перераб. и доп.— М.: Высш. шк., 1990.— 352 с.



УДК [621.039+621.311.24:621.039]:614.876(470+571)

M.C. Хвостова

ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЛАВУЧЕЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Россия, как и остальные страны-члены «ядерного клуба», вступила в период массового вывода из эксплуатации (ВЭ) ядерных и радиационно-опасных объектов (ЯРОО). В ближайшие 15 лет должна быть решена судьба 20 атомных энергоблоков, 18 промышленных реакторов, около 90 судов атомно-технического обслуживания, надводных кораблей и ледоколов, свыше 50 ядерных исследовательских установок мощностью от нескольких кВт до 150 МВт, а также ряда крупных предприятий ядерно-топливного цикла (ЯТЦ). Неотложные решения требуются по 20 открытым бассейнам-хранилищам жидких радиоактивных отходов (ЖРО) с суммарной активностью порядка $1,3 \cdot 10^8$ Ки; практически исчерпан проектный срок эксплуатации 16 предприятий системы «Радон», на которых со средоточено свыше 200000 м³ радиоактивных отходов (РАО).

Недостаточно проработанная нормативно-законодательная база и отсутствие технических решений в данном вопросе делает задачу вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) сложно выполнимой. Положительным опытом по выводу из эксплуатации и комплексной утилизации ОИАЭ в России является опыт предприятий судостроительной отрасли по утилизации атомных подводных лодок (АПЛ). Несмотря на сложившуюся в начале 1990-х годов кризисную финансово-экономическую ситуацию, совпавшую с массовым выводом из эксплуатации АПЛ, эти предприятия смогли объединить свои усилия, изыскать внутренние резервы и привлечь имеющиеся бюджетные средства и иностранные инвестиции для решения этой задачи [1].

Плавучая атомная теплоэлектростанция: вывод из эксплуатации

В настоящее время ГК «Росатом» реализует проект строительства атомных станций малой мощности (АС ММ) на базе плавучего энерго-

блока (ПЭБ) с реакторными установками (РУ) типа КЛТ-40С. В соответствии с разработанной «Концепцией генеральной схемы размещения АС ММ на территории РФ» планируется создание АС ММ в районах с децентрализованным энергоснабжением. Общее количество АС ММ составит 7 единиц. К районам децентрализованного энергоснабжения относятся районы Крайнего Севера и Дальнего Востока.

В состав АС ММ на базе ПЭБ входят:
плавучий энергоблок с двумя реакторными установками КЛТ-40С;

гидротехнические сооружения, обеспечивающие надежную установку плавучего энергоблока и передачу электрической и тепловой энергии на берег (операционная акватория; причалы для установки ПЭБ; знаки навигационной обстановки; оградительные сооружения; устройства для передачи электрической и тепловой энергии на берег);

береговые сооружения, предназначенные для передачи электрической и тепловой энергии потребителям (устройства для распределения и передачи электроэнергии потребителям; комплекс сооружений теплового пункта; инженерные сети и транспортные коммуникации; помещения административно-хозяйственных служб).

Такая атомная станция представляет собой уникальный энергоисточник нового поколения, созданный на базе российских технологий гражданского судостроения и военного атомного кораблестроения.

Основные характеристики АС ММ: водоизмещение — 21 тыс. т; длина — 140 м; ширина — 30 м; осадка — 5,56 м; автономность: по ядерному топливу — 2,5–3 года, по органическому — 30 суток; полный назначенный срок службы — 35–40 лет; срок службы до заводского ремонта — 10–12 лет; продолжительность ремонта — 1 год; периодичность постановки в док — 12 лет. Тепловая мощность каждой реакторной установки — 150 МВт, электрическая — 35 МВт. Мак-

симальная теплофикационная мощность — 146 Гкал/ч. Реакторная установка (типа КЛТ-40С) имеет длительную положительную историю эксплуатации на ледоколах «Таймыр», «Вайгач» и лихтере «Севморпуть» [2].

С учетом объемов образования и накопления твердых радиоактивных отходов (ТРО) за период эксплуатации 10–12 лет (межремонтный период), а также возможности транспортирования их к месту хранения с последующей выдачей на берег на ПЭБ предусматриваются: хранилище низкоактивных ТРО; хранилище среднеактивных и высокоактивных ТРО.

Хранилище среднеактивных и высокоактивных ТРО совмещено с хранилищем отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) в едином блоке под единой биологической защитой (помещение хранилищ ОТВС и ТРО).

Как и у любого объекта использования атомной энергии, конечная стадия жизненного цикла АС ММ — процесс вывода ее из эксплуатации. Для обеспечения экологической, ядерной и радиационной безопасности Дальневосточного региона и региона Арктики (как наиболее уязвимого и экономически перспективного) при выводе из эксплуатации плавучей атомной электростанции (ПАЭС) необходимо разработать концепцию и методологию инженерно-экологического сопровождения этого процесса.

Одно из важных мероприятий, осуществляемых при процедуре вывода из эксплуатации ПАЭС, — утилизация ПЭБ.

Комплексная утилизация ПЭБ может быть основана на апробированном опыте реализации этапно-позиционного метода по утилизации АПЛ, который был получен в ОАО ЦС «Звездочка» (г. Северодвинск) и ДВЗ «Звезда» (г. Большой Камень). Сущность этапно-позиционного метода заключается в том, что он обеспечивает выполнение работ по утилизации в определенной последовательности (поэтапно) и на специально оснащенных местах (площади, помещения), называемых позициями [3].

Однако технология утилизации надводных судов с ядерными энергетическими установками (ЯЭУ), в том числе и ПЭБ, вследствие их специфики и конструктивных особенностей будет отличаться от сложившейся технологии утилизации АПЛ. Это определяется в основном большими массогабаритными характеристиками реакторных помещений ПЭБ [4].

Несмотря на то, что утилизация ПЭБ будет представлять новую технически и технологически сложную задачу, весь объем работ можно разделить на несколько этапов по уже существующей схеме утилизации АПЛ:

разработку технико-экономической оценки (ТЭО) вариантов выгрузки ОЯТ и РАО, а также утилизации ПЭБ для выбора наиболее оптимального;

разработку и согласование комплекта проектной и организационной документации на утилизацию ПЭБ, разработку материалов оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС), получение заключения Государственной экологической экспертизы;

дооснащение (если это необходимо) существующих мощностей на предприятии, производящем утилизацию ПЭБ;

выгрузку ОЯТ и РАО;

временное хранение контейнеров с ОЯТ на площадке предприятия, отправку контейнеров на ПО «Маяк»;

переработку и отправку на хранение РАО;

разрезку ПЭБ на части;

утилизацию носовой и кормовой оконечностей;

переработку и отправку на хранение токсичных промышленных отходов;

формирование блока реакторного отсека, транспортирование его в пункт долговременного хранения.

Изложенная схема позволит разделить сложную задачу утилизации ПЭБ на несколько этапов для четкого планирования подготовки производства и организации работ по утилизации.

Возможные варианты вывода ПЭБ из эксплуатации и демонтажа РУ:

демонтаж РУ непосредственно на ПЭБ после выдержки 50 лет («отсроченный» демонтаж);

демонтаж РУ с разборкой на отдельные части непосредственно на ПЭБ после выдержки в течение 2 лет («немедленный» демонтаж);

демонтаж РУ на ПЭБ без длительной выдержки крупным блоком и его хранение;

демонтаж на ПЭБ без длительной выдержки РУ блоком минимального размера, его разборка и разделка (без длительной выдержки или с длительной выдержкой) в условиях цеха специализированной организации.

Выбор окончательного варианта утилизации ПЭБ может быть определен после того, как оценены следующие параметры:



радиационная обстановка на судне на момент вывода из эксплуатации, включая расчетные уровни внешнего гамма-нейтронного излучения, загрязнения поверхностей помещений, оборудования, а также наведенной активности оборудования и конструкций судна;

объем, активность и нуклидный состав РАО на момент вывода из эксплуатации, способы их переработки, хранения и захоронения;

количество и суммарная активность ОТВС в хранилищах и реакторах судна;

последовательность операций по удалению на берег ионообменных смол, ТРО, ЖРО, ОТВС и демонтированного оборудования;

последовательность операций по подготовке ПЭБ к разделке и утилизации, таких, как дезактивация и промывка оборудования I и III контуров, цистерн ЖРО, систем охлаждения ОТВС, дезактивация помещений и оборудования;

ориентировочная длительность выдержки ПЭБ до начала работ по разделке (если выдержка необходима);

радиационная обстановка перед началом работ по разделке ПЭБ;

последовательность работ по разделке ПЭБ; технологический регламент работ с оборудованием защитной оболочки;

прогноз индивидуальных доз внутреннего и внешнего облучения персонала при проведении различных работ по подготовке к утилизации и разделке ПЭБ;

трудозатраты на проведение планируемых работ;

коллективные дозы, получаемые персоналом за весь период работ по выводу из эксплуатации ПЭБ;

перечень возможных аварийных ситуаций при производстве работ по выводу из эксплуатации, разделке и утилизации ПЭБ, меры по предупреждению, локализации и ликвидации последствий радиационных аварий;

возможные выбросы радиоактивных и загрязняющих химических веществ в окружающую среду в нормальных и аварийных условиях;

количество и активность РАО, образующихся при проведении работ по выводу из эксплуатации, разделке и утилизации ПЭБ.

Утилизация ПЭБ будет сопровождаться радиационными и химическими факторами воздействия на окружающую среду, персонал и население [5]. Основными критериями, выполнение

которых должно быть оценено при разработке документации в обеспечение утилизации ПЭБ, являются:

непревышение суммарных выбросов радиоактивных веществ (РВ) и вредных химических веществ (ВХВ) сверх установленных нормативов предельно допустимых выбросов;

непревышение суммарных сбросов РВ и ВХВ со сточными водами;

непревышение суммарных объемов промышленных отходов, установленных лимитами на размещение отходов;

обеспечение организационными мерами и техническими средствами безопасности производственной деятельности и возможных аварийных ситуаций в процессе утилизации ПЭБ;

безопасность населения селитебной зоны при производственной деятельности предприятия, выполняющего утилизацию ПЭБ, в нормальных и аварийных условиях.

«Узкие места» при выводе из эксплуатации ОИАЭ обусловлены:

несовершенством законодательной и нормативной базы;

отсутствием общегосударственных региональных хранилищ РАО и ОЯТ. Имеющиеся на объектах хранилища РАО не соответствуют современным требованиям по обеспечению экологической безопасности; существующие системы обращения с РАО не обеспечивают требуемого кондиционирования, вследствие чего на большинстве объектов во временные хранилища направляются РАО, форма которых неприемлема ни с технической, ни с экономической точек зрения; отсутствует автоматизированная система учета и контроля за образованием и хранением РАО;

отсутствием мощностей по переработке, а также свободных объемов для долговременного хранения дефектного ОЯТ.

Выход из эксплуатации объектов атомной энергетики — актуальное, самостоятельное, технически сложное и наукоемкое направление совершенствования использования атомной энергии как в нашей стране, так и за рубежом.

Обеспечение экологической и радиационной безопасности при выводе из эксплуатации ПАЭС и утилизации ПЭБ должно быть заложено на начальном этапе жизненного цикла АС ММ.

Выход ПАЭС из эксплуатации и утилизация ПЭБ с ЯЭУ должны осуществляться на основа-

нии концепции комплексной промышленной утилизации АПЛ с разработкой ресурсосберегающих и экологически чистых технологий.

Процесс утилизации ПЭБ содержит ряд этапов или состояний ПЭБ с РУ, реакторного отсека и РУ, при которых выполнение определенных работ потенциально опасно (в ядерном и радиационном аспекте).

Качественная и количественная оценка накопленной при эксплуатации ПАЭС радиоактивности, а также состав характерных дозооб-

разующих изотопов оказывают определяющие влияние на процесс вывода из эксплуатации в части обеспечения радиационной безопасности персонала и населения. С учетом этого тезиса необходимо определить, проанализировать и сформулировать основные аспекты вывода из эксплуатации ПАЭС. При этом наиболее значимы из них инженерно-экологические аспекты по обращению с отработавшим ядерным топливом, радиоактивными и химическими токсичными отходами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кузнецов, В.М.** Вывод из эксплуатации объектов использования атомной энергии [Текст] / В.М. Кузнецов, Х.Д. Чеченов, В.С. Никитин.— М.: Изд-во ООО «НИПКЦ Восход-А», 2009.— 628 с.
2. **Саркисов, А.А.** Ожидаемые радиационные и радиоэкологические последствия эксплуатации плавучих атомных теплоэлектростанций [Текст] / А.А. Саркисов, В.Л. Высоцкий, В.П. Билашенко [и др.] // Атомная энергия.— Т. 104. Вып. 3.— С. 178–187.
3. **Никитин, В.С.** Реализация концепции комплексной утилизации АПЛ на предприятиях Северодвинска [Текст] / В.С. Никитин // Вопросы утилизации АПЛ.— 2002. № 2.— С. 54–57.
4. **Никитин, В.С.** Разработка документации в обеспечение утилизации надводного корабля класса «Адмирал Ушаков» [Текст] / В.С. Никитин, И.В. Комаров // Вопросы утилизации АПЛ.— 2005. № 3(7).— С. 14–29.
5. **Кузнецов, В.М.** Радиоэкология и радиационная безопасность (история, подходы, современное состояние) [Текст] / В.М. Кузнецов, В.С. Никитин, М.С. Хвостова.— М.: ООО «НИПКЦ Восход-А», 2011.— 1208 с.



ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 543.426:539.16.04:556.53

В.И. Гуменюк, А.В. Кулинкович

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРАНСФОРМАЦИИ РАССЕЯННОЙ ЭНЕРГИИ АССОЦИИРОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ ВОДЫ НА ГЕНЕРАЦИЮ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА В РАСТВОРАХ СОЛЕЙ УРАНА

Аварии на АЭС и объектах ядерной энергетики обусловили поступление большого числа долгоживущих радионуклидов в окружающую среду. Высокая миграционная способность урана и его соединений, обладающих большой токсичностью, в объектах окружающей среды, их способность к аккумулированию в почвах и иловых отложениях обусловливают необходимость создания экспрессных методов контроля в природных водах. Данная задача весьма актуальна, так как ее решение повышает безопасность населения в районах расположения ядерно-энергетических объектов.

Имеется достаточная приборная база, с помощью которой можно проводить высокочувствительный контроль наличия урана в объектах окружающей среды, однако существующие методы анализа урана сложны и длительны по времени выполнения [1], кроме того, они не позволяют количественно определять содержание урана непосредственно на месте загрязнения, а требуют доставки проб в лабораторию. За время транспортировки и хранения пробы ее химический состав в результате адсорбционных и окислительно-восстановительных процессов меняется, что приводит к недостоверным результатам определения степени загрязнения природных вод. В связи с этим актуально создание полевого экспрессного метода оценки радиационного загрязнения окружающей среды, прежде всего — воды как среды, способствующей наиболее быстрому распространению радиоактивного заражения местности.

Формы нахождения урана в воде зависят от водородного показателя среды и примесей, вли-

яющих на окислительно-восстановительные параметры среды. Уран — металл переменной валентности, и в водной среде наиболее устойчивы соединения урана шести- и четырехвалентной формы. Причем четырехвалентная форма урана находится преимущественно в восстановленной среде, а в окисленной он существует в виде шестивалентной формы [1]. В природных водах, имеющих нейтральную или слабокислую среду ($pH = 6,5\text{--}7,0$), насыщенную кислородом, уран находится в виде иона уранила UO_2^{2+} . Последний способен образовывать комплексные соединения с анионами различных кислот, которые хорошо растворимы в воде. Соли уранила устойчивы только в кислых средах, в нейтральных они способны гидролизоваться, при этом скорость гидролиза возрастает в зависимости от степени разбавления. Известно [2], что гидролиз четырехвалентного урана протекает легче, чем шестивалентного, особенно в сильно разбавленных растворах. Гидратированный ион уранила $\text{UO}_2(\text{UO}_3)\text{OH}^+$ в слабокислых средах существует в форме псевдоколлоида, который при $pH = 5\text{--}6$ перезаряжается и несет уже на себе отрицательный заряд. Такое образование способно формировать в воде в присутствии HCO_3^- и CO_3^{2-} отрицательно заряженный карбонатный комплекс типа $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ и $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^{2-}$, устойчивый в интервале $pH = 7,5\text{--}10$. Закисление воды до $pH = 5\text{--}6,5$ приводит к разрушению карбонатных комплексов и образованию коллоидов гидроокиси уранила. Наличие в воде повышенной жесткости способствует образованию труднорастворимых солей уранила типа уранотоллита, бейлита и др.



Кроме того, соли уранила могут взаимодействовать и с органическими соединениями, например гуминовыми кислотами, находящимися в водной среде, с образованием уранорганических соединений.

Таким образом, преобладание той или иной формы урана в водной среде будет определяться главным образом ее гидрохимическим составом, количеством и характером твердой взвеси, окислительно-восстановительным потенциалом и показателем кислотности среды [1, 2].

Наиболее устойчивые водорастворимые соединения уранила в воде существуют при $pH = 2,0\text{--}4,2$. В этих условиях соли урана не подвергаются гидролизу и имеют наименьшую сорбционную активность по отношению взвешенным примесным частицам [2].

В последние годы в литературе появились данные, что вода имеет гетерогенный состав, в котором в качестве твердой фазы выступает ее ассоциированное (связанное) состояние [3], формирующееся особыми двумерными структурами аллотропных форм льда.

В работе [4] приводятся данные исследований по ассоциации молекул воды в водно-солевых и водно-органических растворах, показывающие, что в солевых растворах ионы растворенного вещества находятся на поверхности связанных состояний воды. Это позволяет предположить, что ионные переходы урана в водной среде вызваны фазовой перестройкой в ассоциированных состояниях воды. С другой стороны, в пределах фазового перехода имеет место локальное изменение диэлектрических и электрохимических параметров, которые могут оказывать влияние на растворитель — ассоциированную воду, вызывая распад связанного состояния. Эти процессы должны сопровождаться генерацией АФК в растворе и приводить к увеличению содержания пергидроксил ион-радикалов $\text{HO}_2^{(-)}$.

Таким образом, изменение энергетических параметров среды в точках фазовых переходов ионов урана приводит к трансформации одной ионной формы в другую вследствие перестройки в ассоциатах воды, и в результате данного процесса в водной среде генерируются активные формы кислорода. При этом в водных растворах урана должно наблюдаться резкое повышение концентрации свободных радикалов и ион-радикалов, связанных с фазовыми переходами II

порода в исследуемых растворах (перестройка поверхностных стабилизирующих слоев ассоциатов воды).

Следовательно, на формирование фазовых состояний урана в воде влияет изменение водородного показателя и окислительно-восстановительного потенциала среды, флуктуация ионной силы в водной среде. В точках фазового перехода, как это следует из тонкой структуры спектра UO_2^{2+} , происходит резкое (нелинейное) изменение физико-химических параметров водной среды, что приводит к изменению содержания активных форм кислорода в воде.

Известно [5], что переход одной ионной формы урана в другую сопровождается передачей электрона:



В работе [6] на основе изучения структуры межмолекулярных водородных связей, формирующихся в процессе комплексообразования в водных и органических системах, авторы показали, что подобные связи могут образовываться как за счет формирования анионных самоассоциатов (алифатические спирты), так и за счет свободных ионных пар (фенолы). Кроме того, в результате исследований установлено влияние электронного распределения в структуре вещества на образование водородной связи, особенно в сложных полимерных матрицах, причем константа роста полимерной цепи определяется составом водоорганических смесей, точнее, концентрационным распределением в ней компонентов. Таким образом, введение примесей в равновесную систему изменяет в ней электронное распределение, переводя ее в неравновесное состояние. В результате этого процесса в системе возникают новые ассоциированные состояния (структурированные), возбуждение которых приводит к появлению в водной среде активных форм кислорода.

Наличие структурообразования в водных системах подтверждается и в работе [4], в которой исследовалась электропроводность разбавленных растворов неорганических соединений (NaCl и KCl) и органических, содержащих аминокислоты. Авторами показано, что в основе частотного спектра водного раствора соединения лежит спектр самой воды. При этом в зависимости от введенного в нее соединения возникают



осцилляционные пики в разных частотных областях (низкие концентрации). Повышение содержания вещества в пробе вызывает как возрастание основных осцилляционных пиков, так и появление новых, что связано с наличием примесей в составе основного соединения. В то же время введение в водный раствор соединения другого вещества приводит к сдвигу осцилляционных пиков основного соединения в более высокую частотную область, т. е. появление нового соединения в воде как бы «занимает в растворе свою нишу», вытесняя (или сжимая) ранее находившиеся в нем соединения, создавая для них более узкие частотные области (рис. 1).

В работе [3] авторами предложена кластерная модель воды, в основу которой положены нематически связанные состояния воды (ион-кристаллические ассоциаты). Согласно данной теории между нематической частью и поверхностной пленкой ассоциата находится структурированная жидкость с плоскими доменами кубического или тетрагонального льда, стабилизированными структурным давлением адсорбированной жидкости.

Согласно работе [3] ассоциаты, принадлежащие различным фазам кристаллического состояния воды, отличаются диэлектрическими характеристиками, а их ван-дер-ваальсово

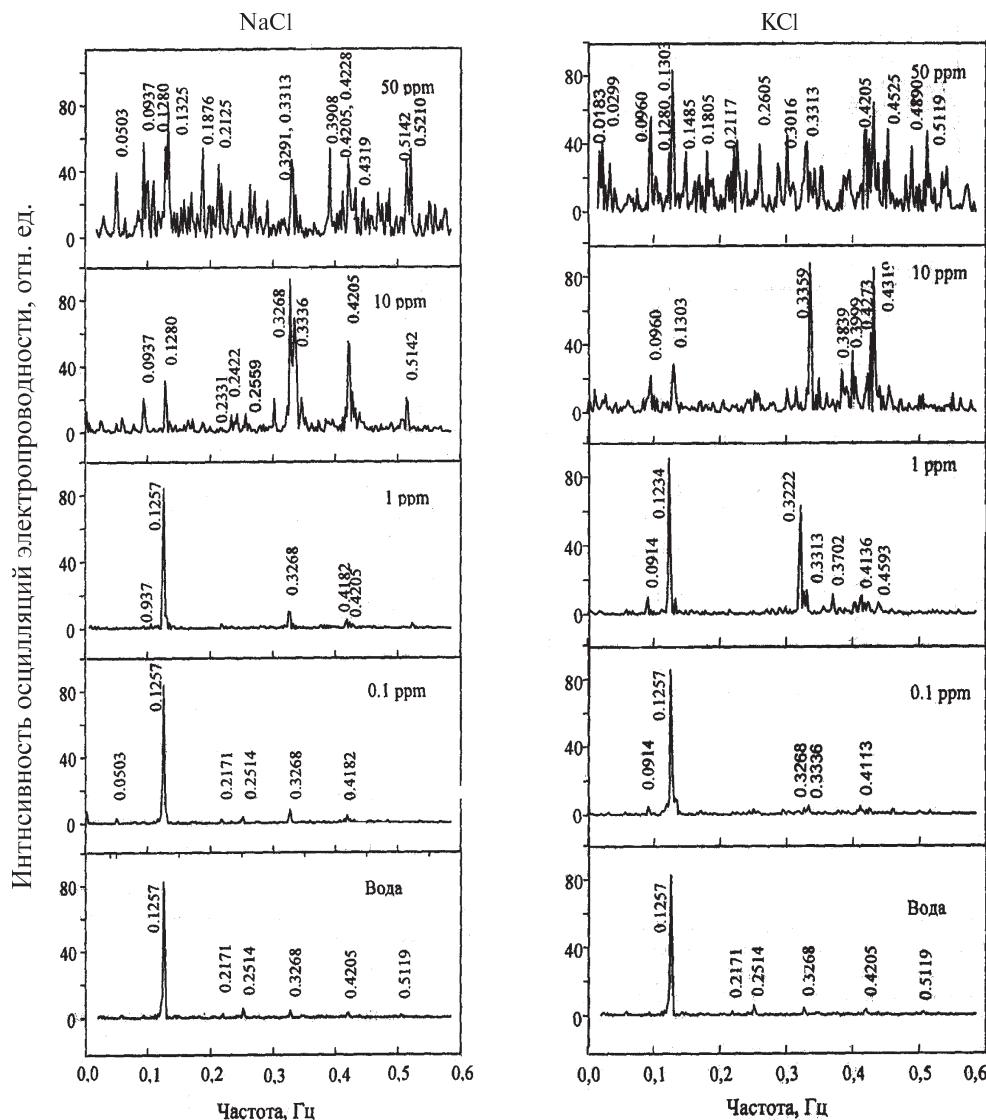


Рис. 1. Частотные спектры осцилляций электропроводности разбавленных растворов NaCl и KCl

взаимодействие проявляется как притяжение для спектрально подобных молекул вводимого в жидкость вещества. В свою очередь, наличие сил притяжения для протоноакцепторных веществ у ассоциата положительной полярности и протонодонорных свойств — у ассоциата отрицательной полярности создает условия для направленной диффузии веществ в соответствии со знаком их дальнего взаимодействия.

Следовательно, разрешенными направлениями диффузии веществ в полярной жидкости являются направления к центральной части нематика и вдоль границ нематика ассоциата. По-средством дальнодействующих сил в системе постоянно устанавливается неоднородное распределение растворяемых в жидкости веществ. При этом структурированные слои, содержащие кристаллическую фазу, ведут себя как центры адсорбции, создавая избыточное насыщение растворяющимися веществами относительно свободной жидкости.

Введение в структурированные слои веществ иной природы по сравнению с молекулами воды сопровождается изменением потенциалов межмолекулярного взаимодействия, что вызывает изменение параметров дальнего взаимодействия, а следовательно, термодинамического и структурного равновесия. Так, при введении сильных электролитов структурированность сильно уменьшается, а при добавлении в воду поверхностно-активных веществ, наоборот, увеличивается.

Появление в воде соединений урана приводит, как и при добавлении поверхностно-активных веществ (ПАВ), к повышению ее структурируемости. В то же время наличие в водной среде ПАВ, как и металлов переменной валентности, вызывает изменение физико-химических характеристик среды ассоциатов, что в свою очередь способствует их перестройке и усилинию процесса наработки активных форм кислорода в воде.

Таким образом, ассоциированные состояния в воде и водных растворах обладают особыми электрофизическими свойствами. В работе [3] предполагается, что процессы перезарядки ионов как в самом ассоциате, так и между ассоциатами осуществляются посредством туннелирования электронов, носящего кооперативный характер. Это означает, что обмен электронами между макроскопическими структурами ассоциатов может рассматриваться как перенос маг-

нитной энергии. Следовательно, в воде существуют структуры связанных состояний воды (ион-ассоциаты), несущие монополярные отрицательный и положительный заряды. В свою очередь, в работе [3] показано, что ассоциаты воды как двумерные жидкокристаллические структуры отвечают условиям для стабильного существования высокотемпературного ферми-состояния носителей заряда.

Ферми-системы с бозе-конденсацией представляют собой пространственно-коррелированную структуру куперовских пар, электрон-дырочных возбуждений и фононов [3]. Роль фононов в динамике сверхпроводников заключается в обмене энергией между электронами неравновесного сверхпроводника и внешней средой. Прямое влияние фононов определяет процессы поглощения рассеянной энергии среды, обратное — проявляется в виде преобразования энергии электронов в электромагнитную энергию. Особое значение процессы преобразования энергии, осуществляемые в сверхпроводниках, приобретают в связи с явлениями стимуляции сверхпроводимости в связанных состояниях жидкофазных систем и переноса электронов в виде электромагнитных волн.

Сверхпроводимость воды (СП) [12], экспериментально наблюдаемая при ее импульсном пробое, а также при воздействии на воду вихревых электромагнитных волн, характеризуется резким возрастанием тока проводимости подобно тому, как это имеет место в большинстве низкоразмерных неорганических сверхпроводников. Протекание тока в воде вызывает сильную пространственную неоднородность в виде каналов проводимости, что сопровождается выделением в пределах каналов зон с резким скачкообразным светорассеянием, которые характеризуются измененными значениями pH .

Известно [13], что высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) обладают слоистой структурой. В подобных структурах, как и в связанных состояниях воды, характеризуемых цепочечным упорядочением типа ($\cdots O^- - H \cdots O^* - H \cdots$), куперовские пары имеют крайне малую длину когерентности (~ 1 нм), но вместе с тем большую плотность. Для объяснения механизма спаривания электронов в слоистых структурах оксидов предложено много моделей, которые включают образование биполяронов, электрон-дырочные взаимодействия и др.

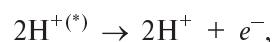
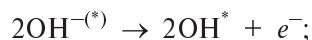


Существуют эмпирические критерии для определения ВТСП состояния структур, основные из которых: наличие перехода «металл — диэлектрик»; сопряженные проводящие двумерные слоистые структуры с кислородным мостиком; замещение в поверхностных слоях искаженных метастабильных структур вещества с промежуточными (нечелочисленными) степенями окисления элементов и реальной протяженностью областей гомогенности по кислороду с изменением состава и возникновением дырок в проводящем слое [14].

Очевидно, что данному комплексу условий соответствуют переходные структурно-искаженные слои двумерных льдов, имеющие измененные по сравнению с объемной водой стехиометрические соотношения кислорода и водорода, цепочечные структуры относительноочно прочно ковалентно связанного кислорода, нечелочисленные значения степени окисления и механизм динамического образования дырочных состояний вследствие протонной миграции.

В работе [3] приведена структура двумерного льда, который является диэлектриком в поперечном направлении и имеет проводящие поверхностные слои за счет донорно-акцепторного взаимодействия свободных зарядов гидроксил-аниона и гидроксил-радикала, образующих систему с нечелочисленной степенью окисления вследствие обменных электрон-дырочных взаимодействий, регулируемых протонными миграциями в сопряженных структурах метастабильных льдов. Таким способом обеспечиваются условия для туннелирования электронов. Однако в силу слоистости проводящих структур и их высокой близости друг к другу (расстояние между слоями 2,960 Å — для льда VII и 3,41 Å — для льда VI) сохраняются условия для магнитного взаимодействия свободных электронов и их термодинамически обусловленного спаривания.

Из физических представлений о нечелочисленной валентности участников обменных зарядовых процессов в связанной воде следует закономерный вывод о том, что состояние радикалов в ее двумерных слоях — связанное (радикалы «в клетке»), ионы и связанные радикалы образуют ион-радикальные пары. Распад подобных пар происходит согласно следующим уравнениям:



т. е. в результате распада гидроксил-иона (протоний-ион) образуются две молекулы гидроксила (или два протона) и один свободный электрон.

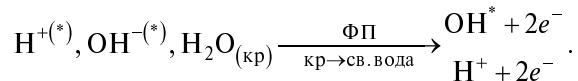
Сверхпроводящее состояние среды обладает рядом свойств, обусловленных нелинейной динамикой параметра порядка, которая определяется обменными процессами с внешней средой.

В работе [3] также показано, что в сверхпроводящих структурах ион-кристаллических ассоциатов воды наблюдается прыжковая электронная проводимость. Так, способность слоистых сверхпроводящих структур к взаимодействиям с магнитными полями сверхмалой напряженности (интенсивность менее 0,1 мТл) — основа подобия свойств воды и сверхпроводящих материалов, магнитная чувствительность которых характерна лишь для джозефсоновских эффектов.

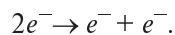
Суть эффекта Джозефсона состоит в том, что через изолирующую прокладку между двумя сверхпроводниками может протекать бездиссипативный сверхпроводящий ток («туннелирование электронных пар»), при этом волновые функции электронов в обоих проводниках оказываются связанными. Если же ток через туннельный переход превысит критический, то между сверхпроводимыми «берегами» возникает разность потенциалов. При этом связь волновых функций не нарушается, а принимает форму нестационарного эффекта Джозефсона. С позиций неравновесной динамики сверхпроводник представляет собой сильно нелинейный элемент, важнейшая особенность которого состоит в том, что нелинейность вольт-амперной характеристики проявляется при очень малых значениях тока и напряжения, чем и объясняется его весьма высокая чувствительность к слабым сигналам.

Возможные механизмы высвобождения энергии:

1. Фазовый переход «ассоциированная вода» → «свободная вода»:



2. Распад куперовской пары электронов:



Образующиеся при распаде куперовской пары электроны — относительно короткоживущие частицы ($\tau_{\text{жизни}} \approx 0,1$ мс); они захватываются молекулами воды с образованием сольватированного электрона.



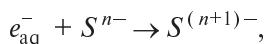
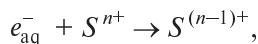
Согласно [10] сольватированный электрон — это электрон, захваченный средой в результате поляризации им окружающих молекул (если средой является вода, то электрон называется гидратированным). В литературных источниках [10, 11] предлагаются различные теоретические модели сольватированного электрона. Наиболее вероятной считается модель, в которой сольватированный электрон является ионным кластером типа $X_n^- X_m$ (X — молекула растворителя; n — число молекул в кластере; m — число молекул в ближайших сольватных слоях), причем n может быть 2, 3, 4, 6 и 8, а m — достигать больших значений. Возникновение кластеров типа X_n^- обнаружено методом фотоэлектронной спектроскопии в парах воды, газообразном аммиаке и т. п.

Время перехода электрона из свободного состояния в сольватированное при 295 К составляет 0,24 пс в воде. При понижении температуры это время увеличивается. Переход происходит через стадию образования локализованного (или предсольватированного) электрона, характеризующегося меньшей энергией захвата средой. Радиационно-химический выход сольватированного электрона при радиолизе воды $G_{e^-} = 2,7 - 2,9$ эл./100 эВ.

Сольватированный электрон — мощный восстановитель. В воде его окислительно-восстановительный потенциал равен $-2,87$ эВ. Для сольватированного электрона характерны реакции трех типов: присоединение к ионам (например, $\text{Cu}^{2+} + e_S^- > \text{Cu}^+$; $\text{NO}_3^- + e_S^- > \text{NO}_3^{2-}$), присоединение к нейтральным молекулам (например, $\text{O}_2 + e_S^- \rightarrow \text{O}_2^-$; $(\text{CH}_3)_2\text{CO} + e_S^- \rightarrow (\text{CH}_3)_2\text{CO}^-$) и диссоциативное присоединение (например, $\text{N}_2\text{O} + e_S^- \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}^-$; $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{Cl} + e_S^- \rightarrow \text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2 + \text{Cl}^-$). Многие реакции сольватированного электрона протекают с высокими скоростями, константа которых находится в диапазоне $2,0 \cdot 10^7 - 2,3 \cdot 10^{10}$ л/(моль·с) [11].

Рассмотрим более детально реакции гидратированного электрона.

Первая группа реакций (реакции восстановления) выражаются следующими общими уравнениями:



где S — нейтральная молекула; S^{n+} — положительный ион; S^{n-} — отрицательный ион.

Одна из наиболее важных реакций этой группы — реакция присоединения электрона к иону водорода с образованием атома водорода:



Эта реакция достаточно быстрая ($2,3 \cdot 10^{10}$ л/(моль·с)) и ее роль при радиолизе кислых растворов весьма велика.

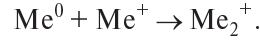
Гидратированный электрон восстанавливает многие ионы металлов. Очевидно, этот процесс происходит в том случае, когда окислительно-восстановительный потенциал пары $S^{n+}/S^{(n-1)+}$ менее отрицателен, чем потенциал

e_{aq}^- . В результате реакций e_{aq}^- с разнообразными ионами металлов формируются их ионы в восстановленной форме (Zn^+ , Cd^+ , Hg^+ , Pb^+ , Ni^+ , Co^+ , Am^{2+} и др.) [12].

Если потенциалы пары $S^{n+}/S^{(n-1)+}$ близки, то реакция становится заметно обратимой.

В отсутствие других растворенных веществ ионы металлов могут окисляться радикалом OH^\cdot и перекисью водорода (например, Zn^+ , Cd^+ , Ni^+ , Co^+ , Hg^+ , Tm^{2+}), диспропорционировать (например, Ni^+ , $\text{Pt}(\text{I})$ и т. п.) и димеризоваться (например, Cd^{2+}). В присутствии растворенных веществ ионы металлов могут реагировать с ними. Так, при взаимодействии с O_2 реакция может протекать двумя путями: по механизму переноса электрона от иона к O_2 (возникает O_2^-) и с образованием промежуточного комплекса типа $\text{MeO}_2^{(n-1)+}$.

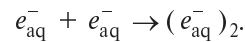
Атомы металлов Me^0 , возникающие в результате реакций e_{aq}^- с Me^+ , часто взаимодействуют с Me^+ :



Образование ионов типа Me_2^+ обнаружено, например, при импульсном радиолизе водных растворов Ag^+ и Tl^+ .

Механизм восстановления комплексных ионов гидратированным электроном довольно сложен. Часто он включает стадию предварительного восстановления молекулы лиганда с образованием промежуточного комплекса.

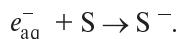
По этому механизму протекает и реакция образования молекулярного водорода через стадию образования биэлектрона:



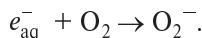


Однако эта частица еще не обнаружена среди продуктов радиолиза. Попытка ее идентификации в облученной воде была сделана, например, в работе [13].

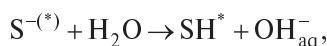
Вторая группа реакций (присоединение к нейтральным молекулам) включает реакции типа



Продукты этих реакций (анион-радикалы) более или менее стабильны. Примером может служить процесс образования O_2^- :



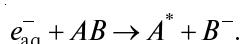
Для анион-радикалов наиболее характерны реакции протонирования (при взаимодействии с H_{aq}^+ или водой) и передачи электрона:



где $\text{S}^{-(*)}$ – анион-радикал; AB – молекула, способная диссоциировать на ионы A^+ и B^- .

В некоторых случаях протонирование идет настолько быстро, что образование $\text{S}^{-(*)}$ не удается наблюдать с помощью метода импульсного радиолиза [12].

Третья группа реакций (диссоциативное присоединение) характеризуется общим уравнением



Конечно, и в этом случае нередко возникают промежуточные анион-радикалы типа $AB^{-(*)}$. Однако для рассматриваемой группы реакций они при обычных условиях весьма нестабильны и быстро распадаются на A^* и B^- . Стабильность $AB^{-(*)}$ существенно зависит от условий образования. Можно ожидать, что она увеличивается в щелочной среде и при понижении температуры.

Методом импульсного радиолиза определены абсолютные константы скорости около 1300 реакций e_{aq}^- [12, 13]. Константы скорости реакций e_{aq}^- с различными соединениями изменяются в широком диапазоне (примерно на 10 порядков).

Реакции e_{aq}^- с ионами металлов являются быстрыми, если окислительно-восстановительный потенциал пары $\text{Me}^{n+}/\text{Me}^{(n+1)+}$ значитель-

но менее отрицателен, чем потенциал e_{aq}^- . Ионы щелочных металлов не могут восстанавливаться гидратированными электронами до атомов металлов. Однако это не исключает возможности образования ионных пар типа $\text{Me}^+ \dots e_{\text{aq}}^-$.

В разбавленных растворах e_{aq}^- не реагирует (или реагирует очень медленно) с ионами щелочноземельных металлов. Хотя указанные ионы имеют положительное сродство к электрону, взаимодействие при этих условиях затруднено из-за их большой энергии гидратации. Взаимодействие, по-видимому, становится возможным только в концентрированных растворах, в которых энергия гидратации уменьшается.

Другими факторами, влияющими на реакционную способность неорганических ионов относительно e_{aq}^- , являются строение иона и водородный показатель среды [14].

В реакциях с неорганическими веществами e_{aq}^- ведет себя как простейший и наиболее сильный нуклеофильный реагент. На его реакционную способность существенно влияют заместители в молекуле органического вещества.

Вместе с тем большое число веществ имеет константы скорости реакций с e_{aq}^- , существенно превышающие $k_{\text{диф}}$. Одно из возможных объяснений данного эффекта – туннельный механизм переноса с e_{aq}^- . В этом случае перенос электрона может осуществляться на расстояния, которые значительно больше расстояний, необходимых для перекрывания орбиталей реагентов в основном состоянии. Расстояние, на которое может при этом переноситься электрон, достигает 1,5–1,6 нм [8].

В пользу туннельного механизма реакций e_{aq}^- свидетельствуют результаты измерения их энергий активации [8]. Различными авторами определены энергии активации E_a более сорока быстрых и медленных реакций e_{aq}^- [14]. Найдено, что все эти реакции характеризуются низкими значениями E_a (от 6 до 23 кДж/моль), которые значительно меньше, чем энергия гидратации (образования e_{aq}^-). Отсюда следует, что высота потенциального барьера реакции (кроме энергии

гидратации, вклад в нее вносят силы отталкивания между e_{aq}^- и электронами реагирующей молекулы и т. п.) много больше энергии активации. Поэтому электрон туннелирует через потенциальный барьер без образования переходного состояния. В случае быстрых реакций процесс туннелирования происходит с трансмиссионным коэффициентом (т. е. с учетом вероятности прохождения системы через переходное состояние или через потенциальный барьер), равным единице. Для медленных реакций этот коэффициент вследствие стерических затруднений или большой толщины барьера меньше единицы.

По данным работ [8, 9] энергия активации реакции e_{aq}^- зависит от константы электролитической диссоциации веществ, что связано с параметрами структурирования ассоциатов воды, оказывающими влияние на подвижность сольватированного электрона.

Таким образом, вода представляет собой сложную систему «ассоциированной» и «неассоциированной» («свободной») воды, причем ассоциированное состояние воды способно обладать свойствами сверхпроводников II рода. При этом в воде путем обменных взаимодействий куперовских пар и последующих химических превращений нормальных электронов энергия внешних электромагнитных полей низкой интенсивности преобразуется в энергию активных форм кислорода и обратно. Введение в водные растворы различных соединений может приводить либо к катализированию, либо к ингибиции процессов генерации активных форм кислорода в воде, что связывается со структурными перестройками ассоциатов. Изменение концентрации АФК в воде в точках фазовых превращений указывает на наличие в ней примесей в виде металлов переменной валентности, в том числе и урана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бекман, И.Н.** Уран [Текст]: Учебное пособие / И.Н. Бекман.— М.: МГУ, 2009.— 300 с.
2. Химия актиноидов [Текст]: В 3 т. / Пер. с англ.; Под ред. Дж. Каца, Г. Сиборга, Л. Морсса.— М.: Мир, 1991. Т. 1.— 525 с.
3. Вода — космическое явление [Текст] / Под ред. Ю.А. Рахманина, В.К. Кондратова / РАН.— М.: Изд-во РАН, 2002.— С. 427.
4. **Ло, Ш.** Наноструктуры в очень разбавленных водных растворах [Текст] / Ш. Ло, В. Ли // Российский химический журнал.— 1999. Т. 43. № 5.— С. 40–48.
5. **Стехин, А.А.** Туннельный перенос электронов из водяной среды [Текст] / А.А. Стехин, Г.В. Яковleva, А.Ю. Кармишин, Е.И. Кантырева // 5-й Междунар. конгресс «АКВАТЭК-2002: Вода, экология, технология». Сб. материалов конгресса.— Москва, 4–7 июня 2002 г.— М., 2002.— 948 с.
6. **Богачев, Ю.С.** Спектрально-структурные закономерности формирования водородных связей в концентрированных водных и органических системах [Текст] / Ю.С. Богачев: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук.— М., 1992.— 46 с.
7. **Шмидт, В.В.** Введение в физику сверхпроводников [Текст] / В.В. Шмидт / МЦИМО.— М., 2000.— 402 с.
8. **Чайкин, П.** Сверхпроводимость и магнетизм в органических металлах [Текст] / П. Чайкин, Р. Грин // Физика за рубежом.— М.: Мир, 1988.
9. **Гинзбург, В.Л.** О науке, о себе и о других: статьи и выступления [Текст] / В.Л. Гинзбург.— М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2001.— 496 с.
10. **Пикаев, А.К.** Сольватированный электрон в радиационной химии [Текст] / А.К. Пикаев.— М.: Наука, 1969.— 460 с.
11. **Харт, Э.** Гидратированный электрон [Текст] / Э. Харт, М. Анбар / Пер. с англ.— М.: Атомиздат, 1973.— 280 с.
12. **Пикаев, А.К.** Импульсный радиолиз и его применение [Текст] / А.К. Пикаев, С.А. Кабанчи, И.Е. Макаров, Б.Г. Ершов.— М.: Атомиздат, 1980.— 280 с.
13. **Пикаев, А.К.** Реакционная способность первичных продуктов радиолиза воды: Справ. [Текст] / А.К. Пикаев, С.А. Кабанчи.— М.: Энергоатомиздат, 1982.— 201 с.
14. **Гоголев, А.В.** // Химия высоких энергий [Текст] / А.В. Гоголев, И.Е. Макаров, А.К. Пикаев.— 1981. Т. 15.— С. 109–112.



УДК 621.039

В.Ю. Попов, М.Е. Федосовский, А.Ю. Туманов

МОНИТОРИНГ ИЗОТОПОВ КСЕНОНА ДЛЯ ЗАДАЧ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АВАРИЙНЫХ И ПРЕДАВАРИЙНЫХ СОСТОЯНИЙ НА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

Образование изотопов ксенона в основном имеет техногенную природу и происходит в результате работы атомных электростанций, радиохимических предприятий по переработке ядерных отходов, исследовательских реакторов и несанкционированной ядерной деятельности.

Диагностировать аварийные и предаварийные состояния на ядерных энергетических объектах (ЯЭО) по анализу объемной активности изотопов ксенона весьма удобно, так как ксенон является благородным газом и при обычных условиях не вступает в химические реакции с другими элементами и химическими соединениями. В то же время измерение ксенона — весьма сложная техническая задача в связи с тем, что его концентрация в атмосферном воздухе незначительна (составляет 0,0087 %). Необходимо отметить, что другая существенная проблема связана с очисткой от мешающих примесей. Например, спектрометрический препарат должен быть очищен от радона более чем в 10^7 раз. Причина кроется в том, что радон имеет близкие энергии β и γ распада и фоновая активность его на порядки больше активности изотопов ксенона.

Измерение изотопов ксенона при контроле состояния ядерных энергетических объектов широко используется в странах Западной Европы и Северной Америке. Для этих задач используются как прямые, так и косвенные методы. Например, в Германии на протяжении последних 30 лет РБГ — ксенон, криптон измеряют в непрерывном режиме.

В Канаде же для контроля уровня выбросов на комбинатах по производству изотопов широко применяется косвенный метод. На близлежащей территории там установлено поле сцинтилляционных детекторов, предварительно откалиброванных с использованием высокочувствительного ксенонового оборудования.

В настоящее время мониторинг изотопов ксенона в РФ производится только при решении задач Договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний (ДВЗИ). В 1996 году на заседании генеральной ассамблеи ООН был принят закон о запрещении испытаний ядерного оружия во всех средах, на основании которого в Вене (Австрия) была учреждена комиссия по подготовке данного закона. Также в Вене был создан международный центр данных, предназначенный для обработки информации, поступающей со станции международной системы мониторинга (МСМ).

По соотношению объемной активности изотопов ксенона (Xe^{131m} , Xe^{133m} , Xe^{131} , Xe^{135}) можно диагностировать режимы работы реактора. На рис. 1 показан годовой цикл образования изотопов ксенона в реакторе типа ВВЭР (топли-

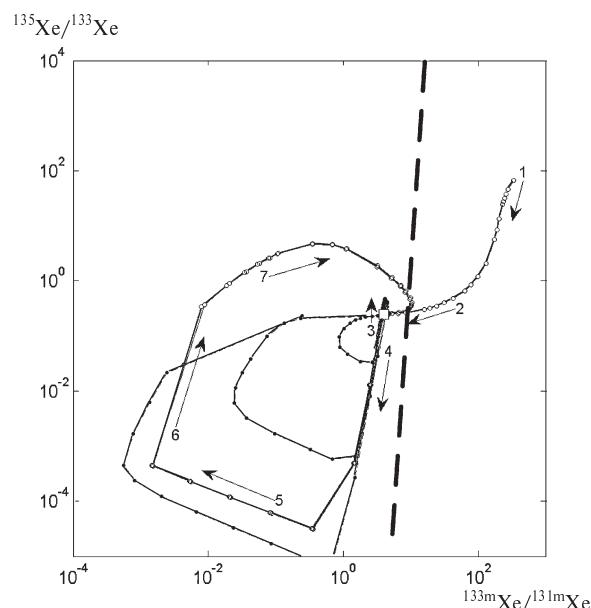


Рис. 1. Годовой цикл образования изотопов ксенона в реакторе типа ВВЭР

во — 3,2 %-й обогащенный U^{235}). При нормальной работе, запущенного реактора соотношение изотопов соответствует точке равновесия (метка 2 графика на рис. 1). Если отношение находится справа от линии раздела, то это может свидетельствовать о неконтролируемой цепной реакции. На представленном рисунке видно, что в данном домене реактор находится только во время запуска со свежим топливом (участок 1 кривой). Кратковременное увеличение Xe^{135} наблюдается после остановки реактора (участок 3 кривой). Участок 4 кривой связан с радиоактивным распадом после остановки реактора для проведения его плановой проверки. Участок 5 кривой соотносится с плановой проверкой реактора и низким нейтронным пучком во время ее проведения. Участки 6 и 7 представляют собой соответственно запуск реактора на полную мощность и достижение точки равновесия.

При нормальной эксплуатации АЭС накопленные в реакторе радиоактивные вещества практически не могут попасть в окружающую среду благодаря ряду защитных барьеров на пути их возможного выхода. Наиболее значительную роль в формировании радиационной обстановки в районе размещения АЭС играют инертные радиоактивные газы и изотопы йода.

Механизм выхода летучих радиоактивных веществ в окружающую среду из технологического цикла АЭС с реакторами ВВЭР и РБМК имеет ряд различий. Основной путь поступления газо-аэрозольных выбросов в окружающую среду от реакторов ВВЭР — это дегазация и испарение воды теплоносителя первого контура. Вода насыщается радиоактивными веществами в результате активации и непосредственного ее контакта с негерметичными оболочками ТВЭЛов. Непосредственным источником поступления в атмосферный воздух летучих радиоактивных веществ от реактора ВВЭР служит вентиляционная система герметичных помещений первого контура и самого реактора. Нуклидный состав газообразных выбросов АЭС с РБМК в основном определяется газами, поступающими с инжекторов турбины, — это радионуклиды продуктов деления (радионуклиды криптона и ксенона).

Все парогазовые и аэрозольные выбросы с АЭС проходят систему очистки. Вначале их выдерживают определенное время в газгольдерах (камеры выдержки) для распада короткоживущих радионуклидов или производят их очистку

на специальных установках подавления активности. Для очистки вентиляционного воздуха от аэрозолей в составе вентиляционных систем на АЭС предусматриваются фильтровальные станции. Это блоки с различными адсорбирующими фильтрами (угольные, аэрозольные). Эффективность очистки на таких фильтрах довольно высока. Поэтому наиболее целесообразно для определения активности всех четырех изотопов ксенона производить забор воздушных проб из системы вентиляции реакторного зала до систем очистки. Несмотря на все предпринятые меры очистки, значительная часть РБГ попадает в окружающую среду и позволяет производить измерения объемных концентраций изотопов ксенона на значительном расстоянии от точки инжекции.

К сожалению, прямой метод измерения ксенона на данный момент на ЯЭО в РФ не применяется. Оценка выбросов ксенона производится косвенным путем при помощи соотнесения расчетных данных с измеренной мощностью дозы. Измеряя объемные активности изотопов ксенона в системе вентиляции реакторного зала можно также довольно-таки точно определять уровень выбросов I^{131} , I^{133} а также аэрозольные выбросы изотопов стронция и цезия — Cr^{89} , Cr^{90} , Cs^{134} и Cs^{37} — продуктов распада газообразных нуклидов, которые являются основным фактором, влияющим на радиационную обстановку вблизи АЭС.

Таким образом, измеряя изотопы ксенона в ЯЭО и на значительном удалении от него, можно решать следующие задачи:

производить проверку текущего состояния реактора (подтверждение его точки равновесия или определение текущего технологического процесса);

по величине объемной активности изотопов ксенона определять радиационное состояние активной зоны реактора (наличие трещин в ТВЭЛ, герметичности контура охлаждения и т. д.);

косвенным путем по схемам распада и зная коэффициент очистки на угольных и аэрозольных фильтрах, производить определение уровня аэрозольных и газовых радиоактивных выбросов и таким образом оценивать радиационную обстановку вблизи и на удалении от ЯЭС;

с большой вероятностью обнаруживать аварию на ЯЭО по факту регистрации значительно превышения хотя бы одного изотопа ксенона;



сигнализировать о скором приходе радиоактивных аэрозолей по факту обнаружения превышения объемной активности изотопов ксенона при известной априорной информации об аварии на ЯЭО;

Мониторинг ксенона на удалении от ЯЭО предъявляет более высокие требования к техническим параметрам ксенонового оборудования, но позволяет контролировать состояние нескольких ЯЭО. При установке оборудования за пределами ЯЭО также необходимо проводить непрерывный мониторинг метеоусловий с высоким шагом разрешения. Уже созданы и опробованы на практике модели переноса воздушных масс, позволяющие с большой вероятностью определять предполагаемые координаты точки инжекции ксенона. Дополнительно данный подход позволяет контролировать объекты за пределами РФ, а также в некоторых случаях производить контроль за несанкционированной деятельностью других стран, тем самым расширяя текущую сеть мониторинга по ДВЗЯИ. Так, например, установка станции мониторинга в Санкт-Петербурге позволит производить мониторинг трех российских и двух иностранных АЭС (рис. 2), а также исследовательского реактора в г. Гатчина (Ленинградская область).

Для задач мониторинга изотопов ксенона в приземном слое атмосферного воздуха в Ради-

евом институте имени В.Г. Хлопина был разработан комплекс ARIX-02. Данный комплекс может быть использован как для задач определения аварийных и предаварийных состояний на ЯЭО, так и для задач ДВЗЯИ. Внешний вид комплекса представлен на рис. 3, а его основные технические характеристики следующие:

Производительность по отбору

воздуха 2, м³/ч

Режим пробоотбора непрерывный

Параметры режима пробоотбора

для одного канала:

время пробоотбора; 12 ч

суммарный объем отобранного воздуха 20 м³

Режим работы

комплекса автомат. управление

Время измерения препарата

ксенона в спектрометре 18 ч

Время до доклада 34 ч

Частота предоставления

результатов дважды в день

Методы измерения:

концентрации

ксенона газовая хроматография

активности ^{131m}Xe,

^{133m}Xe, ¹³³Xe, ¹³⁵Xe сцинтилляционный,

γ-спектрометр β-γ-совпадений



Рис. 2. Зона слежения за ЯЭО станции мониторинга в Санкт-Петербурге



Рис. 3. Комплекс ARIX для мониторинга изотопов ксенона в приземном слое воздуха

Минимальная детектируемая концентрация (MDC) при стандартном режиме пробоотбора и измерения при доверительном уровне $P = 0,95/P = 0,68$:

для ^{131m}Xe}	.....	0,3/0,1 мБк/м ³
для ^{133m}Xe}	.....	0,4/0,1 мБк/м ³
для ^{133}Xe}	.....	0,2/0,1 мБк/м ³
для ^{135}Xe}	.....	0,9/0,3 мБк/м ³

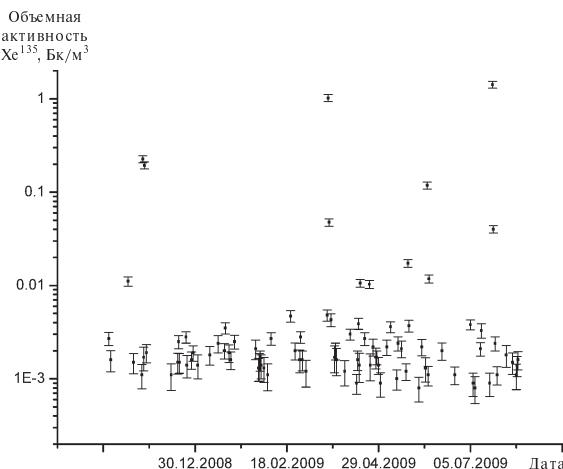


Рис. 4. Объемная активность Xe^{135} , измеренная на станции RN01 (Буэнос Айрес, Аргентина)

Мощность, потребляемая от трехфазной сети 380 ± 38 В, $50 \pm 2,5$ Гц и однофазной сети 220 ± 22 В, $50 \pm 2,5$ Гц:

средняя (в сутки); 6,2 кВА
пиковая (дважды в сутки по 2 часа) 9,2 кВА

Комплекс ARIX установлен на трех станциях МСМ, в 2012 году планируется установка еще на двух станциях на территории РФ. Во время опытной эксплуатации были подтверждены заявленные технические характеристики комплекса, его надежность и целесообразность применения для задач мониторинга неисправностей на ЯЭО. На графиках рис. 4 и 5 представлены результаты объемной концентрации изотопов Xe^{133} и Xe^{135} в регионе г. Буэнос-Айреса (Аргентина) по данным опытной эксплуатации комплекса ARIX-02.

Представленные данные наглядно демонстрируют значительные превышения объемных концентраций изотопов ксенона. В среднем раз в два месяца регистрировались тысячекратные превышения объемной активности Xe^{133} и Xe^{135} . Значительные превышения изотопов ксенона регистрировались еженедельно. Источником радиоактивных выбросов является исследовательский реактор RA-3, расположенный в 30 км от станции мониторинга. Данный реактор был создан в Аргентине и относится к легководяному типу с топливом на низкообогашенном уране. Мощность реактора составляет 4,5 МВт. Основное предназначение реактора — производство изотопов.

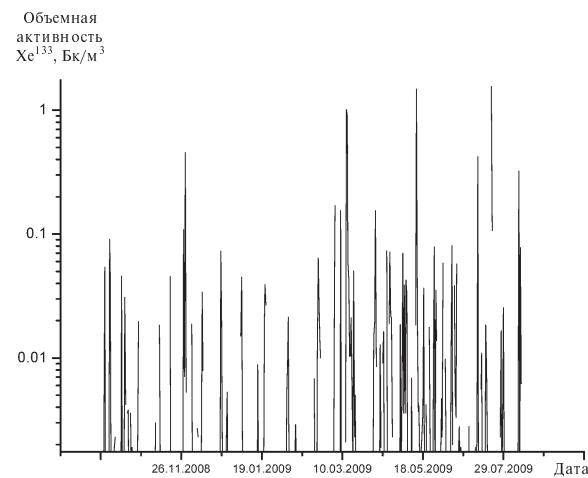


Рис. 5. Объемная активность Xe^{133} , измеренная на станции RN01 (Буэнос Айрес, Аргентина) в приземном слое атмосферного воздуха



В ближайшее время планируется увеличить мощность реактора до 10 МВт, создать дополнительные фильтровальные установки в системе вентиляции, а также производить мониторинг ксенона в непосредственной близости от реактора.

По результатам опытной эксплуатации комплекса ARIX-02 установлено, что фон Xe^{133} в регионе Буэнос-Айреса составил 0,6 мБк/м³.

Высокий антропогенный фон объемной активности изотопов ксенона в районе станции

MCM RN01 делает неэффективным размещение на ней ксенонового оборудования для задач ДВЗЯИ. В то же время полученные данные подтверждают способность комплекса ARIX-02 производить мониторинг аварийных состояний на ЯЭО и целесообразность его использования для этих задач. Следует отметить, что для каждого типа ядерного объекта необходима своя модель определения его текущего состояния по результатам мониторинга изотопов ксенона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов, В.Ю. Xe^{133} в приземном слое воздуха Санкт-Петербурга [Текст] / Ю.С. Попов, Ю.В. Дубасов, В.Ю. Попов, Н.М. Казаринов, В.В. Мишуринский, Н.В. Скирда // Радиохимия.— 2005. Т. 47. № 5.— С. 472–475.
2. Попов, В.Ю. Измерение низких активностей ксенона осколочного происхождения методом β - γ совпадений / Ю.С. Попов, Н.М. Казаринов, В.Ю. Попов, Ю.М. Рыков, Н.В. Скирда // Приборы и техника эксперимента.— 2005. № 2.— С. 1–7.
3. Попов, В.Ю. Автоматическая установка АРИКС-01 для измерения концентраций радиоактивных изотопов ксенона в атмосферном воздухе [Текст] / Ю.В. Дубасов, Ю.С. Попов, В.В. Преловский [и др.] // Приборы и техника эксперимента.— 2005. № 3.— С. 108–104.
4. Попов, В.Ю. Мобильная полуавтоматическая установка АРИКС-03П для измерения низких концентраций радиоактивных изотопов ксенона в воздухе и подпочвенном газе [Текст] / В.В. Преловский, Н.М. Казаринов, А.Ю. Донец [и др.] // Приборы и техника эксперимента.— 2007.— № 3.— С. 117–121.
5. Попов, В.Ю. Environmental Radioxenon Levels in Europe: a comprehensive overview [Текст] / V. Popov, P. R.J. Saey, C. Schlosser, P. Achim [et al.] // Pure and Applied Geophysics.— 2010.— Bazel, Switzerland.— DOI 10.1007/s00024-009-0034-z

УДК 574

А.С. Куракин, С.В. Холодкеевич, С. Пурвиня,
И. Барда, Э. Римша, А.В. Кулинкович

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АКВАТОРИЙ РИЖСКОГО ЗАЛИВА

Влияние деятельности человека на загрязненность акваторий Балтийского моря было замечено еще в начале прошлого века, но именно в течение последних десятилетий экологическое состояние моря заметно ухудшилось [1, 6, 7]. Небольшой объем моря, а также длительный период обновления вод (30–50 лет) определяют его низкую способность к самоочищению и высокую чувствительность к антропогенному воздействию со стороны примыкающих регионов [12], обусловленному в первую очередь производством атомной энергии, сельским хозяйством, транспортировкой нефти и нефтепродуктов,

бросом бытовых и производственных сточных вод и др. [13, 15, 17]. Антропогенная нагрузка на акватории Балтийского моря в значительной степени связана с поступлением загрязнений с водами рек его бассейна. Так, за счет сточных вод от промышленной и бытовой деятельности ежегодно в море попадают 600 тыс. тонн нефти, 4 тыс. тонн меди, 4 тыс. тонн свинца, 50 тонн кадмия и 33 тонны ртути [14]. Комплексный подход к предупреждению последствий негативных антропогенных воздействий на экосистему Балтийского моря определяет необходимость геологического мониторинга как акваторий моря,



так и водоемов, входящих в состав его водосборного бассейна. В последние годы широкое применение находят методы биологического мониторинга, связанные с использованием реакций биомаркеров гидробионтов на изменения качества среды обитания [2, 3, 8, 9, 16]. Физиологические биомаркеры (кардиоактивность, дыхание, двигательная активность) позволяют получать достоверную интегральную оценку реакции организма на воздействия загрязняющих веществ [3, 5]. В наших недавних работах было показано, что время восстановления частоты сердечных сокращений (ЧСС) двустворчатых моллюсков после стандартизованного тест-воздействия может служить перспективным экотоксикологическим биомаркером для интегральной оценки воздействия загрязняющих веществ на состояние водных экосистем [2, 4, 11]. Целью настоящей работы было сравнение экологического состояния выбранных акваторий Рижского залива, а также ряда внутренних пресноводных водоемов и водотоков северо-запада Латвии на основе использования этих экотоксикологических биомаркеров.

В статье представлены результаты экспериментального исследования, выполненного в рамках проекта HYDROTOX: «Внедрение инновационных экотоксикологических методов для идентификации влияния загрязнения естественного и антропогенного происхождения в латвийских территориальных водах» (HYDROTOX

Nr. 2009/0226/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/080) за период с 15.05.2011 по 15.10.2011.

Материалы и методы. В качестве объектов исследования были выбраны:

a) четыре станции Рижского залива (рис. 1), из которых одна — референтная (расположена в 7 км от берега вдали от производственных сбросов населенных пунктов), три другие — с разной степенью антропогенной нагрузки (в эстуариях рек, протекающих по территориям с высоким уровнем промышленного производства и населения);

б) пять акваторий пресноводных водоемов и водотоков северо-запада Латвии (рис. 2), из которых одна — референтная, а четыре другие — с разной степенью антропогенной нагрузки.

В качестве тест-организмов на солоноводных станциях Рижского залива использовались моллюски *Macoma balthica*. Отлов животных и их тестиирование на следующий день производились ежемесячно с мая по сентябрь. Тест-организмы для пресноводных объектов — *Unio pictorum*; отлавливались и тестились на следующий день ежемесячно с июля по сентябрь.

Методической основой проводимого исследования служила обнаруженная нами ранее корреляция между адаптивной способностью тест-организмов к стандартизованным функциональным нагрузкам и уровнем загрязнения их среды обитания [4]. В настоящем исследовании адаптивная способность тест-организмов оцени-

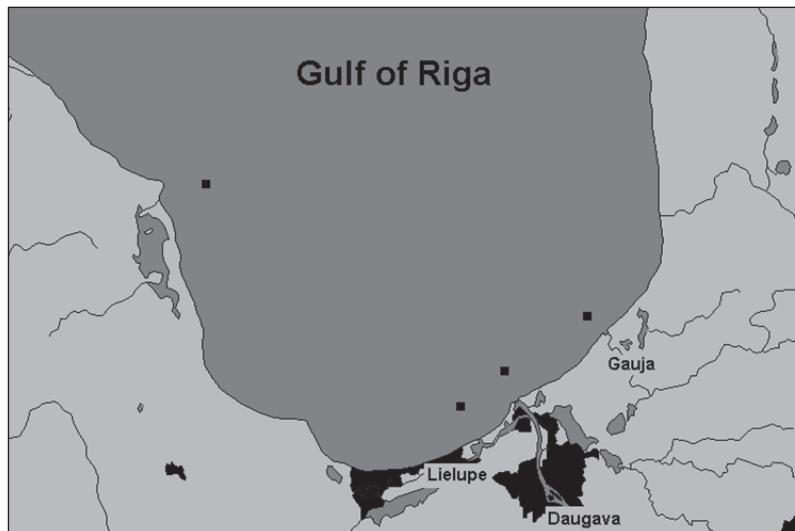


Рис. 1. Расположение станций Рижского залива:
2 — 101A; 3 — 163B; 4 — 167B; 5 — VAD2 (референтная)

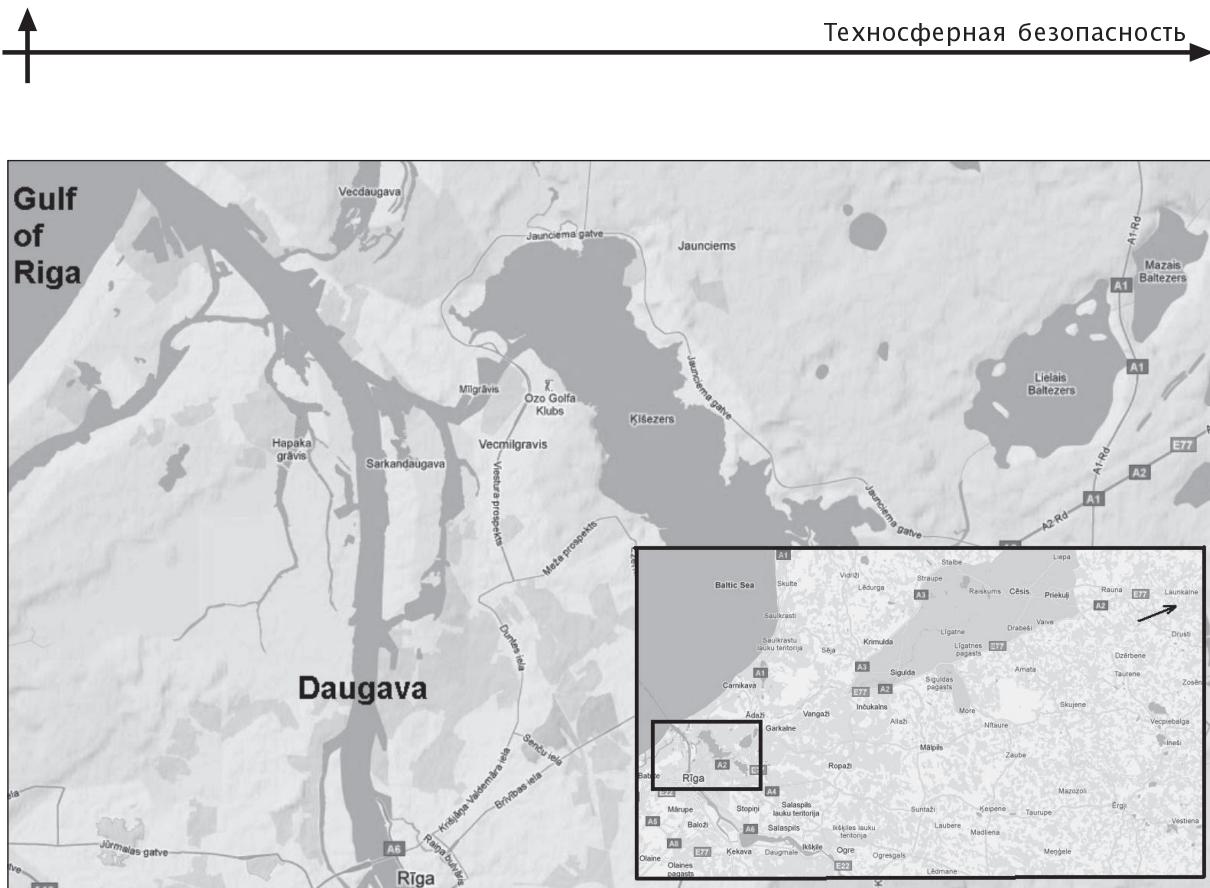
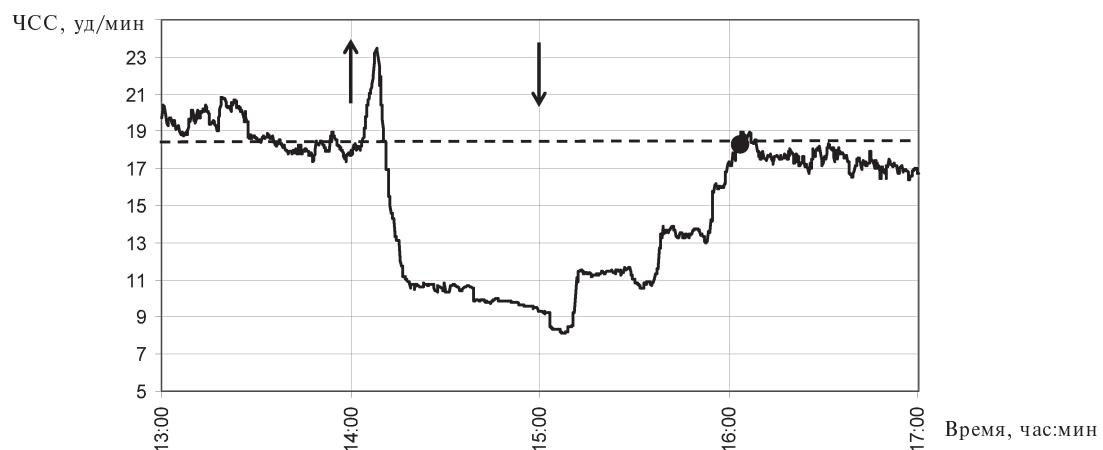


Рис. 2. Расположение станций пресноводных водоемов:

6 — Mazais Baltezers (MB); 7 — Hapaka grā vis (HAP); 8 — Sarkandaugava (SDG); Kīšezers (KE);
10 — Lizdoles (LIZ, референтная)

валась по измерению величин реакций их кардиоактивности (рис. 3) на разработанные ранее в НИЦЭБ РАН [2, 4, 11] стандартизованные тест-воздействия (кратковременное, одночасовое изменение солености на 50 %, а также быст-

рое повышение температуры в аквариуме на 3 градуса на 1 час). При этом в качестве основного экотоксикологического биомаркера служило время восстановления ($T_{\text{восст}}$) ЧСС тест-организмов после снятия функциональной нагрузки.

Рис. 3. Пример реакции кардиосистемы моллюсков *Unio Pictorum* (станция MB) на кратковременное тест-воздействие (повышение солености).

Стрелка вверх — начало тест-воздействия. Стрелка вниз — снятие нагрузки.
Черная точка — момент восстановления ЧСС к фоновому уровню (пунктирная линия).

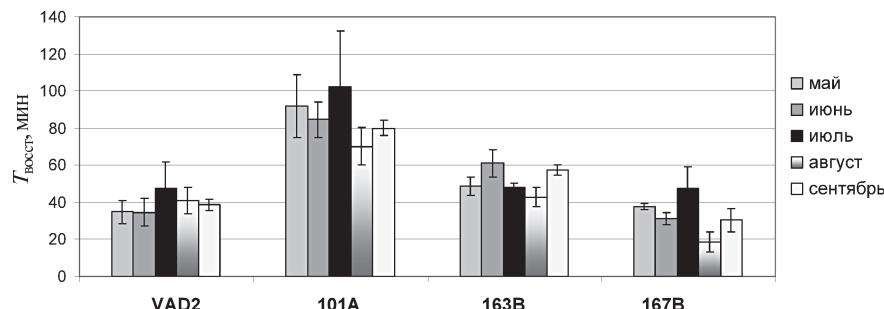


Рис. 4. Результаты измерения $T_{\text{вост}}$ ЧСС моллюсков *Macoma balthica* из солоноводных станций Рижского залива 101А, 163В, 167В и VAD2 (референтная станция) в мае—сентябре 2011 года.

Различия между станциями статистически достоверны (ANOVA, $P < 0,05$)

Для регистрации и анализа характеристик кардиоактивности выбранных тест-организмов (по семь в каждом тестировании) в реальном времени использовался неинвазивный волоконно-оптический биоэлектронный метод [3, 10]. Система сбора и анализа данных включала фотоплетизмограф, аналого-цифровой преобразователь и компьютер с оригинальным программным обеспечением VarPulse8.7. Время восстановления $T_{\text{вост}}$ вычислялось как времен-

ной интервал между моментом прекращения тест-воздействия и моментом возвращения ЧСС к фоновому значению. Дисперсионный анализ (ANOVA) был применен для проверки статистической достоверности различия между станциями.

Результаты. На рис. 4 и 5 представлены результаты тестирования адаптивных способностей выбранных тест-организмов из исследованных станций.

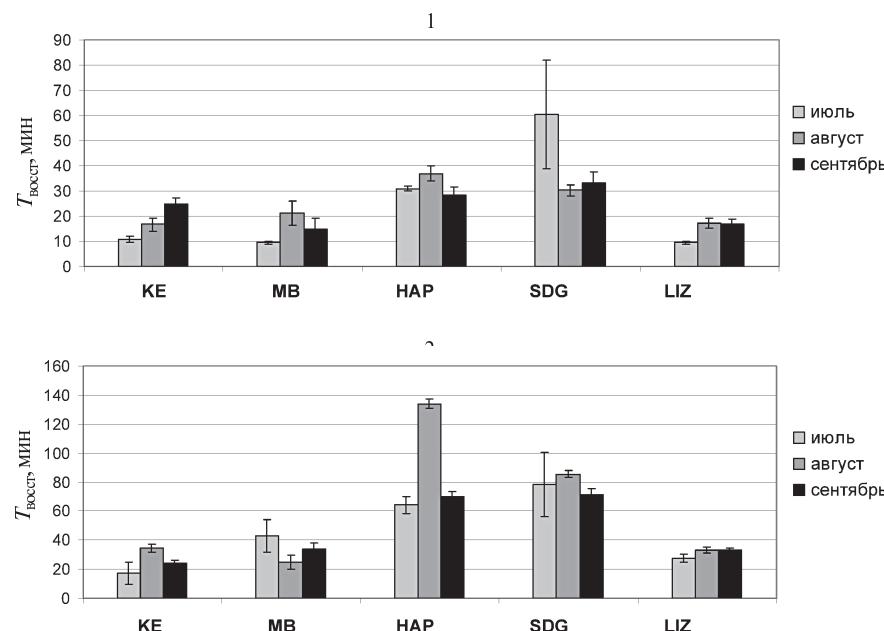


Рис. 5. Результаты измерения $T_{\text{вост}}$ ЧСС моллюсков *Unio pictorum* из пресноводных станций KE, MB, HAP, SDG и LIZ (референтная станция) в июле—сентябре 2011 года.

Тест-воздействия: 1 — изменение солености, 2 — изменение температуры.
Различия между станциями статистически достоверны (ANOVA, $P < 0,05$)



Средние значения времени восстановления, вычисленные по всем экспериментам для станций VAD2, 101A, 163B и 167B Рижского залива, составляют соответственно $39,2 \pm 3,2$; $84,9 \pm 6,6$; $51,2 \pm 2,4$ и $32,1 \pm 3,4$ минут. Станции 101A и 163B могут быть отнесены к «более загрязненным» по сравнению с референтной станцией VAD2. Станция 101A — «наиболее загрязненная». Станция 167B — «наименее загрязненная» из четырех. Средние значения времени восстановления, вычисленные по всем экспериментам для станций KE, MB, НАР, SDG и LIZ пресноводных водоемов, составляют соответственно $23,7 \pm 3,7$; $34,0 \pm 4,6$; $89,4 \pm 10,6$; $78,4 \pm 1,9$ и $31,4 \pm 1,6$ минут для тест-воздействия с изменением солености и $17,0 \pm 2,0$, $14,8 \pm 1,3$, $32,1 \pm 1,9$, $42,1 \pm 9,1$ и $14,9 \pm 3,7$ минут для тест-воздействия с изменением температуры. Станции НАР и SDG могут быть отнесены к «более загрязненным» по сравнению с референтной станцией LIZ. Станция KE — «менее загрязненная» по сравнению со станциями НАР и SDG. Станция MB наиболее близкая к референтной станции LIZ. Средние значения результатов времени восстановления для эксперимен-

тов с воздействиями температуры и солености имеют положительную корреляцию с коэффициентом 0,894. Результаты исследования (рис. 4 и 5) показали статистически достоверные различия между станциями и в то же время отсутствие существенного различия (ANOVA, $P > 0,05$) между тестами, проведенными в пределах той же станции, но в разные месяцы. Этот факт указывает на отсутствие заметного влияния сезона на уровень функционального состояния тест-организмов, отобранных из одной и той же акватории.

В ответ на идентичные кратковременные тест-воздействия *Macoma balthica* и *Unio pictorum* продемонстрировали статистически достоверные различия $T_{\text{восст}}$, что позволило ранжировать исследованные станции как «более» или «менее» загрязненные по сравнению с референтными станциями. Установлено, что уровень функционального состояния тест-организмов из разных акваторий не имеет сезонной природы (на рассматриваемом временном интервале), а зависит лишь от уровня загрязненности водоема.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мосин, О.В.** Экологические проблемы Балтийского моря и пути их решения [Текст] / О.В. Мосин // Балтийский регион.— 2011.— Т. 1.— С. 41–53.
2. **Холодкевич, С.В.** Волоконно-оптические дистанционные биосенсорные системы непрерывного биологического мониторинга качества поверхностных вод и донных отложений в реальном времени [Текст] / С.В. Холодкевич // Нефть и газ арктического шельфа — 2006: Матер. междунар. конф.— Мурманск, 15–17 ноября.— Мурманск: Изд-во ММБИ КНЦ РАН, 2006.— С. 287–296.
3. **Холодкевич, С.В.** Биоэлектронный мониторинг уровня токсичности природных и сточных вод в реальном времени [Текст] / С.В. Холодкевич // Экологическая химия.— 2007. № 16(4).— С. 223–232.
4. **Холодкевич, С.В.** Новые физиологические биомаркеры для биоиндикации состояния (здравья) водных экосистем на основе оценки адаптивной способности двусторчатых моллюсков с помощью стандартизованных тест-воздействий [Текст] / С.В. Холодкевич, А.В. Иванов, В.В. Трусевич, Т.В. Кузнецова // Матер. IV Всеросс. конф. по водной токсикологии, посвященной памяти Б.А. Флерова, «Антropогенное влияние на водные организмы и экосистемы» и школы-семинара «Современные методы исследования и оценки качества вод, состояния водных организмов и экосистем в условиях антропогенной нагрузки».— Борок, 24–29 сентября 2011 г. [Текст] / С.В. Холодкевич, А.В. Иванов, В.В. Трусевич, Т.В. Кузнецова.— Борок, 2011.— Часть I. С. 224–227.
5. **Depledge, M.H.** Assessment of trace metal toxicity using molecular, physiological and behavioural biomarkers [Текст] / M.H. Depledge, A. Aagaard, P. Guyrkuus // Mar Pollut Bull.— 1995. Vol. 31.— P. 19–27.
6. **Ducrotoy, J.P.** The science and management of the North Sea and the Baltic Sea: Natural history, present threats and future challenges [Текст] / J.P. Ducrotoy, M. Elliott // Mar Pollut Bull.— 2008. Vol. 57.— P. 8–21.
7. **Feistel, R.** State and evolution of the Baltic Sea, 1952–2005 [Текст] / R. Feistel, G. Nausch, N. Wasmund.— John Wiley & Sons, Inc. Hoboken.— New Jersey, 2008.— 1–703.
8. **Hagger, J.A.** (2009) Application of biomarkers to assess the condition of European Saltwater Sites [Текст] / J.A. Hagger, T.S. Galloway, W.J. Langston, M.B. Jones.— Environmental Pollution 2009.— Vol. 157.— P. 2003–2010.

9. Handy, R.D. Depledge M.H. Physiological Responses: Their Measurement and Use as Environmental Biomarkers in Ecotoxicology [Текст] / R.D. Handy // Ecotoxicology.— 1999. Vol. 8: 329–349.
10. Kholodkevich, S.V. Real time biomonitoring of surface water toxicity level at water supply stations [Текст] / S.V. Kholodkevich, A.V. Ivanov, A.S. Kurakin [и др.] // Journal of Environmental Bioindicators.— 2008.— Vol. 3, № 1.— P. 23–34.
11. Kholodkevich, S.V. Experiences on ecological status assessment of the Gulf of Bothnia different sites based on cardiac activity biomarkers of caged mussels (*Mytilus edulis*) [Текст] / S.V. Kholodkevich, T.V. Kuznetsova, K.K. Lehtonen, A.S. Kurakin // ICES Annual Science Conference.— 2011.— 19–23 September.— Gdansk, Poland.— [Электронный ресурс] <http://www.ices.dk/products/CMdocs/CM-2011/R/R2011.pdf>. 12 p.
12. Lass, H.U. General oceanography of the Baltic Sea [Текст] / H.U. Lass, W. Matthäus // In: Feistel R, State and evolution of the Baltic Sea 1952–2005 / Editors. Nausch G., Wasmund N. Hoboken, N.J.— John Wiley & Sons, Inc.— 2008. P. 5–44.
13. Radioactivity of the Baltic Sea, 1999–2006 [Текст] / HELCOM Thematic Assessment. Baltic Sea Environment Proc.— 2009.— Publ. № 117.
14. Rheinheimer, G. Pollution in the Baltic Sea [Текст] / G. Rheinheimer // Naturwissenschaften.— 1998.— Vol. 85(7).— P. 318–329.
15. Schieler, U. Ecology of Baltic Coastal Waters [Текст] / U. Schieler.— Berlin: Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.— P. 428.
16. Wells, P.G. Rapid toxicity assessment and bio-monitoring of marine contaminants — exploiting the potential of rapid biomarker assays and microscale toxicity tests [Текст] / P.G. Wells, M.H. Depledge, J.N. Butler [и др.] // Mar Pollut Bull.— 2001.— Vol. 42, 10.— P. 799–804.
17. Special issue on oil in the Baltic Sea. [Текст] / World Wide Fund for Nature.— Baltic Bull.— 1995. № 2–3.

УДК 627.8:621.22

Б.С. Доброборский, В.И. Гуменюк, М.Е. Федосовский

ПРИЧИНА АВАРИИ НА САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС — ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР

Проект Саяно-Шушенской ГЭС предусматривал различные меры защиты гидроагрегатов как с помощью различных основных и резервных автоматических систем, так и путем многоуровневого контроля силами персонала. Указанные меры должны были исключить возможность возникновения серьезной аварии.

Однако 17 августа 2009 года на Саяно-Шушенской ГЭС имени П.С. Непорожнего — филиале Открытого акционерного общества «РусГидро» в результате обрыва шпилек крышки турбины ротор гидроагрегата № 2 переместился вверх, и вследствие возникшей разгерметизации вода затопила машинный зал с десятью гидроагрегатами, которые получили повреждения различной степени. Произошли разрушения и конструкций здания. В результате аварии погибло 75 человек, пострадало 13.

Вина за аварию была возложена на 25 человек, в работе которых были установлены многочисленные нарушения нормативных и иных документов и мероприятий, приведшие к ава-

рии, например: необеспечение соблюдения требований о регулярном контроле технического состояния основного оборудования СШГЭС; необеспечение условий для принятия акционерным обществом «РусГидро» действенных мер по безопасной эксплуатации СШГЭС и др.

Целью настоящего исследования являлось установление причин многочисленных допущенных руководящими работниками СШГЭС нарушений, рассматриваемых как проявление «человеческого фактора».

В результате выполненных работ установлено следующее.

Комиссия технического расследования причин аварии выявила многочисленные ошибки как разработчиков проекта ГЭС и гидроагрегатов, так и служб эксплуатации, в частности:

в помещениях с постоянным либо временным расположением персонала отсутствовали эвакуационные выходы на отметку, не подвергаемую затоплению;



заводом-изготовителем не были установлены ограничения по работе турбины в нерекомендованной зоне эксплуатации, где происходит неучитываемый повышенный износ ее узлов и агрегатов;

отсутствовала фиксация гаек на шпильках крепления крышки турбины;

система непрерывного виброконтроля, установленного на гидроагрегате № 2 в 2009 году, не была введена в эксплуатацию и не учитывалась оперативным персоналом и руководством станции при принятии решений;

в период с 21.04.2009 по 17.08.2009 наблюдался рост показаний о вибрации турбинного подшипника гидроагрегата № 2 примерно в 4 раза, однако никаких мер принято не было; и многое другое.

Все лица, признанные виновными в аварии, имеющие высшее образование, большой общий стаж работы, возраст в основном старше 50-ти лет и осознающие степень опасности и ответственности на эксплуатируемом объекте, систематически не выполняли часть возложенных на них обязанностей при отсутствии каких-либо объективных причин.

Этот факт, часто именуемый человеческим фактором, можно объяснить следующими причинами.

Функционирование организма человека, как и любого другого живого организма, есть непрерывное чередование циклов биохимических реакций, сопровождающихся фазами потребления и выделения энергии, в основном синтезом из продуктов питания и последующим гидролизом аденоинтрифосфата (АТФ).

Упрощенный график этих циклов показан на рис. 1.

Как видно из рис. 1, в начале реакции происходит интенсивный синтез АТФ, который по-

степенно затухает в результате уменьшения концентрации ингредиентов, участвующих в этой реакции. После достижения минимальной концентрации ингредиентов, синтезирующих АТФ, но одновременно при этом максимального количества синтезированного АТФ синтез АТФ прекращается и начинается его гидролиз.

Количество выделяемой энергии всегда больше потребляемой. Поэтому организм человека всегда находится в устойчивом неравновесном термодинамическом состоянии, а среднее значение энергии организма положительно ($W_{cp} > 0$).

Эти процессы полностью совпадают с теорией неравновесной термодинамики И.Р. Пригожина, в соответствии с которой термодинамические системы переходят из начального состояния, близкого к равновесному, в сильно неравновесное, после чего в результате бифуркации эти системы переходят в другое состояние, характеризующееся другими термодинамическими процессами. В рассматриваемом случае сильно неравновесное состояние определяется максимальным количеством синтезированного АТФ.

Протекание циклов биохимических реакций представляет собой сложный процесс, зависящий от многих условий, которые часто невозможно учесть, но в конечном итоге их скорость и, соответственно, интенсивность выделяемой либо поглощаемой при этом энергии подчиняются закону действующих масс:

$$\frac{dc_a}{dt} = \frac{dc_b}{dt} = kc_a c_b,$$

где c_a, c_b — концентрации веществ; k — константа скорости реакции.

Этот принцип чередования биохимических реакций на уровне клеток, органов, систем и целостного организма в виде различных физиоло-

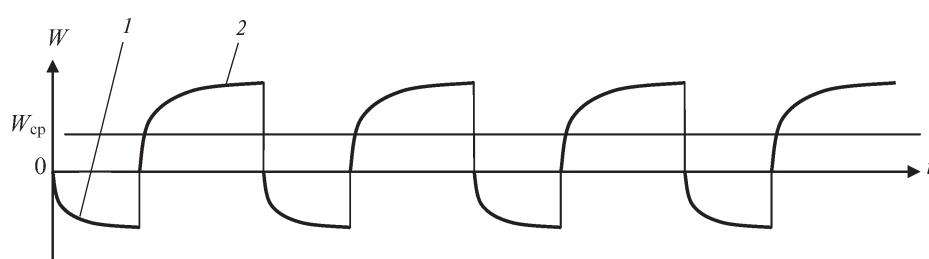


Рис. 1. Упрощенный график синтеза и расщепления АТФ:
1 — синтез АТФ, 2 — гидролиз АТФ

гических колебаний внешне наблюдается в виде биоритмов.

При воздействии на организм человека нагрузок в нем возникают функциональные сдвиги — изменения средних значений физиологических и психологических параметров как реакции на эти нагрузки, например рост температуры тела, пульса или артериального давления.

Как показал проведенный нами анализ, эти функциональные сдвиги есть результат работы систем автоматического регулирования термодинамического состояния организма человека и обеспечивают устойчивость этого состояния. Причем закономерность работы этих систем соответствует теории автоматического регулирования А.М. Ляпунова.

В процессе жизнедеятельности организма человека функциональные сдвиги могут иметь как разовый характер (например, последовательные рост и восстановление пульса в результате подъема тяжести и последующего отдыха), так и периодический (например, суточные и недельные колебания функциональных сдвигов в результате чередований состояний сна и бодрствования). Часто за время сна в течение рабочей недели не происходит полное восстановление функциональных сдвигов, и наблюдается их рост. Полное восстановление функциональных сдвигов происходит лишь за выходные дни, как это показано на рис. 2.

Рис. 2 демонстрируют, что в процессе рабочей недели происходит рост средних значений функциональных сдвигов, а в выходные дни — их восстановление.

Благодаря циклам потребления и выделения энергии организм человека, как и любой другой живой организм, обладает свойством фенотипической адаптации, т. е. способности изменять свои параметры в зависимости от действующих на

него нагрузок для сохранения устойчивости своего неравновесного термодинамического состояния. Причем параметров как физических, так и психологических, так как и те и другие вызывают соответствующие биохимические реакции и закономерности изменения их скорости.

В результате краткого воздействия тех или иных нагрузок у организма происходит оперативная фенотипическая адаптация к этим нагрузкам. При этом параметры организма не изменяются.

Но в результате длительного воздействия тех или иных нагрузок у организма происходит устойчивая фенотипическая адаптация к этим нагрузкам, даже если они являются источниками опасности. Закономерность этих процессов определяется параметрами нагрузок и параметрами организма, на который они воздействуют.

На рис. 3 показан пример упрощенного графика процесса устойчивой фенотипической адаптации к периодической нагрузке с постоянными параметрами.

График на рис. 3 показывает, что в результате воздействия периодической нагрузки с постоянными параметрами происходит постепенная перестройка организма, в результате которой он адаптируется к этой нагрузке. Это можно проиллюстрировать процессами, происходящими у спортсменов, у которых в результате периодических постоянных тренировок изменяется их устойчивое физическое состояние.

Аналогичные процессы фенотипической адаптации, только в значительно большем диапазоне, происходят при психологических нагрузках.

Так, в результате движения на автомобиле с большой скоростью (например, 170 км/ч) организм человека в первое время ощущает ее опасность, но затем по мере движения с этой

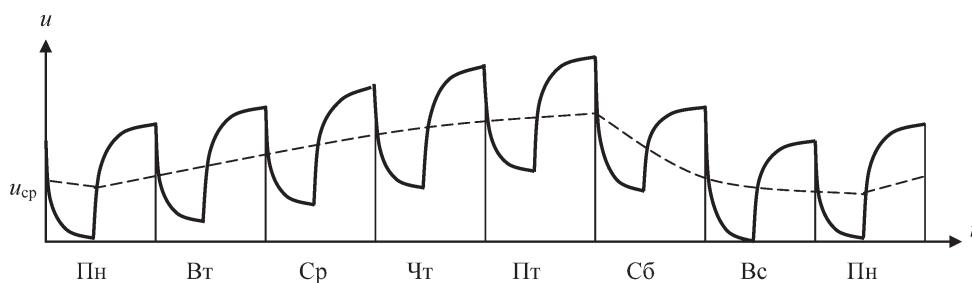


Рис. 2. Типовой график изменения суточных и недельных функциональных сдвигов

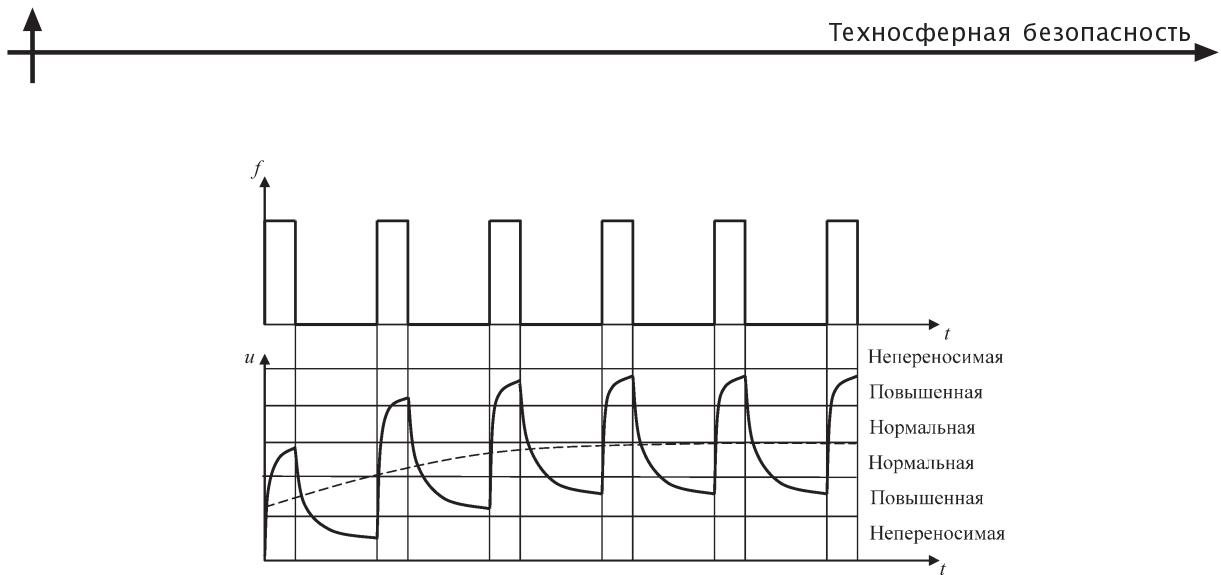


Рис. 3. Пример графика устойчивой фенотипической адаптации к периодическим нагрузкам с постоянными параметрами

скоростью он к ней адаптируется. При этом функциональный сдвиг, например повышение частоты сердечных сокращений, вначале вызванный большой скоростью, постепенно восстанавливается. Зато затем при значительном уменьшении этой скорости (например, до 30 км/ч) в результате фенотипической адаптации у человека создается впечатление, что автомобиль почти не движется, и он может из него выйти и пойти пешком.

Такие же процессы фенотипической адаптации происходят и во многих других случаях, например при реакции врача при виде крови, реакции военных на боевые действия, у персонала, постоянно работающего с источниками повышенной опасности, и т. д.

Те же процессы произошли и у персонала Саяно-Шушенской ГЭС.

В результате работы в комфортных условиях при длительном отсутствии серьезных нарушений в работе Саяно-Шушенской ГЭС у них произошла фенотипическая адаптация.

В результате систематически и без последствий начали допускаться нарушения требований нормативных документов, не выполнялись необходимые мероприятия по обеспечению ее безопасности и даже наличие признаков серьезных нарушений в работе второго агрегата — повышенной вибрации — не вызвало необходимой реакции персонала, в результате чего и произошло авария.

Таким образом, одной из основных причин аварии, к сожалению, не отраженной в акте технического расследования, следует считать отсутствие учета человеческого фактора — естествен-

ного биологического процесса фенотипической адаптации персонала.

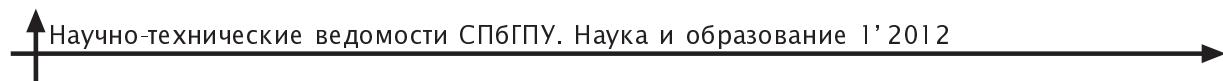
По причине фенотипической адаптации персонала произошли аварии и на других энергетических объектах, в том числе на Чернобыльской АЭС, АЭС Фукусима-1 и других.

Для количественного учета человеческого фактора при решении вопросов безопасности объектов нами была осуществлена разработка способа объективной количественной оценки воздействия на организм человека различных нагрузок.

В качестве критерия воздействия нагрузок было предложено использовать время восстановления функциональных сдвигов, вызванных этими нагрузками. При этом обеспечивается соизмеримость разнообразных по природе и физическим свойствам источников нагрузок и различных физиологических параметров организма человека.

С помощью разработанного способа можно определять количественную оценку степени адаптированности персонала к условиям работы, на основании которой могут быть разработаны меры, исключающие либо значительно уменьшающие вероятность возникновения аварийных ситуаций из-за человеческого фактора.

Как показали проведенные нами исследования, в ряде случаев вероятность отказов из-за человеческого фактора многократно превышает вероятность отказов из-за неисправности машин. Кроме того, действия персонала в определенных случаях, например под воздействием эмоций, паники и др., могут быть в принципе непредсказуемыми.



Поэтому основным путем решения проблемы уменьшения вероятности аварий и катастроф на энергетических объектах следует считать полную автоматизацию их систем управления и контроля состояния и функционирования.

На долю человека в предельном случае должны остаться лишь пассивное наблюдение за работой энергетических объектов по заданным режимам, управление автоматизированными системами и остановка объектов средствами автоматики в необходимых случаях, что лишит его прямого доступа к источникам опасности.

При этом алгоритм работы автоматизированных систем при нештатных ситуациях должен предусматривать в первую очередь автоматическую остановку этих объектов, а не сигнализацию об отказе.

Тем не менее, поскольку полностью исключить участие человека в работе энергетических объектов невозможно, необходим подробный анализ возможных вариантов негативного воздействия человеческого фактора на работу энергетических объектов, включая самые непредсказуемые, и принятие мер для уменьшения возможного ущерба.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доброборский, Б.С. Термодинамика биологических систем [Текст]: Учебное пособие. Б.С. Доброборский / Под ред. проф. Е.С. Мандрыко // СПб.: Палитра, 2006.— 52 с.
2. Патент РФ № 2519576. 2000. Способ оценки величины воздействия на организм человека различных нагрузок [Текст] / Б.С. Доброборский, Е.Н. Кадыскина.— Бюллетень № 33.
3. Ляпунов, А.М. Общая задача об устойчивости движения [Текст] / А.М. Ляпунов.— Классики естествознания. Математика, механика, физика, астрономия.— М.-Л.: Гостехиздат, 1950.— 473 с.
4. Пригожин, И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур [Текст] / И. Пригожин, Д. Кондепуди.— М.: Мир, 2002.— 461 с.



ВОПРОСЫ ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 378.1:53

Н.М. Кожевников

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОГО СОВЕТА ПО ФИЗИКЕ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕХОДА К «УРОВНЕВОЙ СИСТЕМЕ» ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

В мае 2012 года исполняется десять лет Национально-методическому совету (НМС) по физике, сформированному Министерством образования Российской Федерации на базе Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Одновременно с НМС по физике появились и другие советы по общим дисциплинам математического и естественнонаучного цикла (ЕН-цикла), в том числе по математике, химии, биологии и другим. Эти советы должны были сыграть важную организационно-методическую роль в системе российского высшего профессионального образования (ВПО). Дело в том, что существовавшие уже тогда Учебно-методические объединения (УМО) вузов по направлениям подготовки бакалавров, магистров, специалистов «отвечали» за реализацию основных образовательных программ «по вертикали», т. е. от начала процесса обучения в вузе до защиты выпускных работ. Формируя и утверждая государственные образовательные стандарты (ГОС), УМО, как правило, больше внимания уделяли общепрофессиональным и специальным дисциплинам, чем общим дисциплинам ЕН-цикла. Чтобы при этом не снижать уровня фундаментальной подготовки, и были созданы Научно-методические советы — государственно-общественные органы, осуществляющие координацию деятельности научно-педагогической общественности, направленной на повышение качества преподавания соответствующих дисциплин и их научно-методического обеспечения. В отличие от УМО, эти советы должны были как бы «по горизонтали» определять требования и контролировать содержание дисциплины, а также качество ее преподавания для разных направлений под-

готовки. В настоящее время деятельность УМО и НМС находится в ведении Координационного совета Министерства образования и науки Российской Федерации.

Базовым университетом НМС по физике в 2002 году стал СПбГПУ, а председателем совета был назначен академик РАН Ж.И. Алферов. В состав Президиума совета вошли ведущие научные страны, хорошо известные своей активной позицией по проблемам модернизации ВПО. Пять членов Президиума представляют СПбГПУ: Ж.И. Алферов, академик РАН Президент СПбГПУ Ю.С. Васильев, проректор СПбГПУ профессор Д.Г. Арсеньев, профессора СПбГПУ В.К. Иванов (заместитель председателя НМС), Н.М. Кожевников (ученый секретарь НМС), А.Э. Фотиади.

Структурно в НМС по физике входят четыре секции — «Физическое образование в классических университетах» (председатель — профессор МГУ А.М. Салецкий), «Физическое образование в технических вузах» (профессор МАИ Г.Г. Спирин), «Физическое образование в педагогических вузах» (профессор РГПУ имени А.И. Герцена Ю.А. Гороховатский), «Физическое образование в медицинских и сельскохозяйственных вузах» (профессор Новгородского университета имени Ярослава Мудрого В.В. Гаврушко) — и несколько комиссий, в том числе по редакционно-издательской деятельности, по учебному физическому эксперименту, по довузовской подготовке и других.

Основные итоги деятельности НМС по физике

Координирующая роль НМС по физике прежде всего проявилась в организации и проведении масштабных всероссийских научно-

методических конференций «Физика в системе современного образования» и «Современный физический практикум», играющих важную интегрирующую роль в сохранении и развитии уровня фундаментального физического образования в России. Эти конференции проводятся раз в два года, по очереди сменяя друг друга. Последние конференции проходили в 2010 году в Минске и в 2011 году в Волгограде. Конференции обычно собирают сотни участников, их итоги публикуются в специальных сборниках и авторитетных журналах. Кроме того, НМС по физике играет существенную роль в подготовке научно-методических конференций, совещаний, школ-семинаров, организуемых секциями Совета. Совместно с НМС по математике и НМС по информатике наш совет входит в число организаторов международных конференций «Наука в вузах: математика, физика, информатика. Проблемы высшего и среднего профессионального образования», которые состоялись в Польше, Армении и в Москве.

Активно ведется работа по формированию перспективных планов издания и переработки существующих учебников и учебных пособий по физике. Члены Президиума НМС по физике входят в редакционно-издательские советы, общественные редколлегии известных издательств. В настоящее время издательством «Лань» при непосредственном участии НМС по физике продолжается публикация учебников и учебных пособий серии «Классическая учебная литература по физике». Большая работа проводится по рецензированию учебных изданий, представленных к присвоению грифа Минобрнауки России. За последние два года более двадцати таких изданий рекомендовано к присвоению грифа Министерства образования и науки России и грифа НМС по физике. Следует отметить, что это направление деятельности совета сейчас особо актуально, так как современные курсы общей физики очень быстро и существенно меняются, что требует оперативного обновления учебной литературы, в том числе в форме электронных пособий.

НМС по физике сотрудничает с Федеральным институтом педагогических измерений по вопросу совершенствования структуры и содержания тестов по физике в рамках ЕГЭ. Формируя объективную позицию по данному вопросу,

НМС по физике стремится к тому, чтобы усилить положительные стороны этой формы школьной итоговой аттестации.

Один из острых вопросов, находящихся в поле зрения НМС по физике, — содержание и трудоемкость дисциплины «Физика», входящей в федеральный компонент математического и естественнонаучного цикла в стандартах 3-го поколения (ФГОС-3). В связи с тем, что в этих стандартах основное внимание теперь уделяется компетентностным характеристикам результатов освоения основных образовательных программ вузов, актуальной проблемой становится разработка примерных программ дисциплин, где отражены общие требования к конкретным знаниям, умениям и навыкам, формируемым той или иной дисциплиной [1–3]. В 2009-м и 2011-м годах после напряженной, кропотливой работы и детального обсуждения специально созданными комиссиями НМС по физике рекомендовал две такие программы — по физике и по концепциям современного естествознания (для гуманитарных и социально-экономическим направлений подготовки). С этими программами можно ознакомиться на сайте Координационного совета УМО и НМС [4].

Активно работает Комиссия по учебному физическому эксперименту, которая разработала требования к оснащению современного физического практикума, провела анализ состояния лабораторного практикума и демонстрационного оборудования в вузах. При участии этой комиссии, а также российских и зарубежных фирм-производителей учебного оборудования (в частности, Росучприбор, PHYWE (Германия)) на всех крупных научно-методических конференциях были организованы выставки современного экспериментального оборудования.

Следует отметить, что связь НМС по физике с Минобрнауки после 2004 года, когда произошли известные организационно-кадровые изменения в российском правительстве, заметно ослабла. Многие важные решения в сфере образования министерство стало принимать без обсуждения с научно-педагогической общественностью и ни разу не обращалось к НМС по физике за идеологической поддержкой. В результате, к сожалению, ряд советов ЕН-цикла практически прекратили работу. То, что НМС по физике, математике, информатике сохранили свою активность, —



есть результат твердой поддержки этих советов со стороны тысяч профессоров и преподавателей вузов страны, видящих в них надежду на преодоление существующих проблем.

Болевые точки в преподавании физики

На всех конференциях, совещаниях, обсуждениях в средствах массовой информации НМС по физике выступает с критическим анализом проблем преподавания физики в средней и высшей школе, в том числе связанных с переходом к «уровневой системе» ВПО, нормативной базой которой являются государственные стандарты 3-го поколения (ФГОС-3).

Особенно остро обстоят дела в средней школе. Физика в ней становится дисциплиной «по выбору», на единый государственный экзамен по физике записывается все меньше и меньше выпускников: ведь этот ЕГЭ ориентирован на профильный уровень обучения, который охватывает не более 15 % учащихся. Следствие этого — резкое снижение конкурса на технические направления подготовки бакалавров, магистров, специалистов. Кстати, до сих пор не принят федеральный государственный образовательный стандарт по физике для старших классов школ.

Не менее остро, чем в средней, обстоят дела в высшей школе. В примерных программах по многим педагогическим и другим «нефизическим» направлениям физика вообще отсутствует. Там же, где она еще сохранилась, ее трудоемкость в новых стандартах заметно ниже, чем в развитых странах мира. Неудивительно, что наши студенты имеют такую низкую академическую мобильность, а наши вузы — такой низкий рейтинг.

Следует признать, что в преподавании как школьной, так и вузовской физики все больше места занимают теоретические аспекты, в том числе компьютерное моделирование. Физика «отрывается» от окружающего мира, становится схоластической дисциплиной. Для исправления ситуации нужно, чтобы молодежь «видела» физику вокруг себя, умела ставить и анализировать реальные эксперименты. Сейчас во всем мире создаются интерактивные музеи занимательной науки, где школьники и студенты в игровой форме «прикасаются» к миру физики. Примеры таких музеев в последнее время появились и в нашей стране, в том числе в Санкт-Петербурге. НМС по физике активно поддерживает эту тенденцию.



Пленум НМС по физике 11 октября 2005 года



В то же время нас очень беспокоит исключение из базовых учебных программ дисциплины «Концепции современного естествознания» (КСЕ), которая обеспечивала естественнонаучный, мировоззренческий фундамент образования студентов гуманитарных и социально-экономических направлений.

На последнем заседании Президиума НМС по физике в феврале 2011 года было принято Обращение к ректорам российских вузов о положении с преподаванием физики в высшей и средней школе. Ниже приводится полный текст этого Обращения.

Глубокоуважаемые ректоры!

Научно-методический совет по физике Министерства образования и науки Российской Федерации призывает Вас сделать все возможное, чтобы в условиях модернизации российской образовательной системы сохранить те замечательные традиции высшей школы, которыми мы всегда гордились и которые делали нашу страну свободной и независимой, а будущее наших детей и внуков — счастливым и предсказуемым.

К сожалению, следует признать, что реализация намеченных изменений в сфере образования идет по пути, далекому от современных тенденций подготовки кадров высшей квалификации в передовых странах мира. Эти тенденции — увеличение доли фундаментальных естественнонаучных дисциплин, усиление элементов исследовательской работы и другие — обеспечивают выпускникам передовых вузов мира возможность быстрого отклика на результаты естественнонаучных исследований, лежащих в основе новейших технологических решений. Не секрет, что интервал времени, отделяющий открытие физического явления от его внедрения, сократился до 5–8 лет. В этих условиях, очевидно, инженер, обладающий глубокими профессиональными компетенциями исследователя в естественнонаучной области, имеет серьезные конкурентные преимущества.

На прошедшем 11-го февраля 2011 года заседании Президиума НМС по физике отмечалось, что трудоемкость дисциплины «Физика» в новых ФГОС ВПО заметно уменьшилась, что резко снижает академическую мобильность российских



Ж.И. Алферов (слева) и Ю.С. Васильев
ведут заседание Президиума НМС по физике 11 февраля 2011 г.



студентов. Ведь для поступления в магистратуру по инженерно-техническим направлениям в странах Евросоюза, США, Японии требуется подготовка по общей физике в объеме не меньшем, чем 12–14 зачетных единиц, что соответствует приблизительно 400 академическим часам. Большое место в западных университетах уделяется физическому практикуму, позволяющему сформировать у студентов умения и навыки самостоятельной исследовательской работы. В этих условиях большинство российских студентов, изучавших физику в течение двух семестров в объеме менее 8–9 зачетных единиц, просто не сможет поступить и успешно учиться в аспирантуре (докторантуре) зарубежных вузов. Результатом является неуклонное снижение рейтинга российской высшей школы.

Аналогичная ситуация имеет место и в других направлениях высшего образования. Физика постепенно исчезает из так называемых «нефизических» направлений бакалавриата. В примерных программах по педагогическим, медицинским, сельскохозяйственным направлениям эта дисциплина сократилась до 2–3 зачетных единиц и менее, а в программах некоторых профилей педагогического образования («Биология», «География») она вообще отсутствует.

Совершенно недопустимо исчезновение дисциплины «Концепции современного естествознания» (КСЕ) из учебных программ гуманитарных и социально-экономических направлений. Более 15 лет эта дисциплина успешно обеспечивала естественнонаучный фундамент подготовки по этим направлениям, накоплен уникальный опыт преподавания, многие студенты смогли реализовать свой интерес и тягу к естественнонаучным знаниям. И вот мы снова возвращаемся к подготовке кадров, не обремененных элементарными знаниями об окружающем мире.

Мы считаем, что во всех этих случаях для исправления ситуации совсем не обязательно ждать команды сверху. Действующие ФГОС 3-го поколения дают достаточно степеней свободы для

того, чтобы обеспечить качественную подготовку по физике, КСЕ, используя вариативную часть стандартов и внутривузовские составляющие учебных программ.

Призываем вас сплотиться в решении проблем преподавания физики и естественнонаучных дисциплин. Научно-методический совет по физике готов выполнить функции центра интеграции всех позитивных идей и начинаний.

Это обращение было направлено персонально руководителям вузов страны и получило доброжелательную оценку.

НМС по физике объединяет сотни наиболее авторитетных ученых, профессоров, преподавателей школ и вузов России, остро переживающих за проблемы преподавания физики. Можно сказать, что это сообщество, как и другие аналогичные советы, представляет собой уникальный и чрезвычайно ценный социальный капитал страны, который готов нести ответственность за модернизацию российской образовательной системы и, главное, умеет это делать.

Судя по всему, скоро мы станем свидетелями важных правительственные инициатив и решений в сфере образования. НМС по физике готов принять самое активное участие во всем, что будет способствовать сохранению и приумножению традиций преподавания физики в российской высшей школе. А это не только повышение научного и методического уровня учебных программ, оснащение учебного процесса современным лабораторным оборудованием и информационными технологиями. Сейчас все более важную роль играет воспитательный компонент системы образования, связанный с осознанием молодежью ценности знания, с получением огромного удовольствия от самого процесса обучения в вузе, с радостью от понимания удивительной гармонии в природе. Эта сверхзадача определяет и связывает воедино все направления деятельности НМС по физике на ближайшую перспективу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров, А.А. Уровневая система, федеральные государственные образовательные стандарты и примерные основные образовательные программы высшего профессионального образова-

ния России [Текст] / А.А. Александров, М.П. Федоров, В.Н. Козлов, В.В. Глухов [и др.]. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.— 197 с.



2. Анисимов, П.Ф. Задачи вузов по переходу на уровневую систему и федеральные государственные образовательные стандарты высшего профессионального образования [Текст] / П.Ф. Анисимов, Е.Я. Бутко, В.Н. Козлов [и др.]. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.— 112 с.

3. Васильев, Ю.С. Организация учебной деятельности высшего учебного заведения. Правовые основы и технология разработки учебных планов на основе ФГОС ВПО [Текст]: Учеб.-метод. пособие / Ю.С. Васильев, В.Н. Козлов, П.И. Романов [и др.]. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.— 126 с.

4. www.fgosvpo.ru

УДК 51.7

А.Г. Дмитриев, Т.А. Козелецкая, Е.А. Герман

О ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ГУМАНИТАРНЫХ ОБЛАСТЯХ ЗНАНИЙ

«Чистая математика целиком состоит из утверждений типа: если некоторое предложение справедливо в отношении данного объекта, то в отношении его справедливо некоторое другое предложение. Существенно здесь, во-первых, игнорирование вопроса, справедливо ли первое предложение, и, во-вторых, игнорирование природы объекта... Математика может быть определена как наука, в которой мы никогда не знаем, о чем говорим, и никогда не знаем, верно ли то, что мы говорим».

Берtrand Рассел

Как известно, единство естественнонаучного, гуманитарного и инженерного знания составляют основу современного высшего образования. В последние десятилетия развитие системы гуманитарного образования и развитие системы инженерной подготовки пошли, можно сказать, в разных направлениях. В то время как наблюдается гуманитаризация программ подготовки технических специалистов, что нашло свое отражение и в новых образовательных стандартах (ФГОС ВПО), в системе высшего гуманитарного образования, наоборот, произошло резкое сокращение естественнонаучной составляющей. И это тогда, когда методы естественных наук, в частности математическое моделирование, все более широко применяются и в гуманитарных областях знаний, что находит свое отражение в соответствующих названиях. Например, институт социологии РАН РФ издает журнал «Социология: методология, методы, математическое мо-

делирование». В экономической теории сформировалось самостоятельное направление — математическая экономика, в рамках которого рассматриваются математические модели и развивается аксиоматический подход в экономической теории.

Исторически сложилось так, что богатый опыт математического моделирования, накопленный в физике и технических науках, не в полной мере используется представителями гуманитарного знания. Речь идет об особенностях применения математического аппарата в отношении именованных и размерных величин.

Известно, что некорректное использование математических операций с именованными и размерными величинами в предметных областях часто приводит к бессмысленным математическим выражениям. По всей видимости, именно это обстоятельство и послужило основанием для введения экономистом Морисом Алле тер-



мина «математическое шарлатанство» [1]. Примеры из экономической теории и ссылки на оригинальные работы разных авторов на этот счет можно найти, например, во второй главе монографии [2].

Напротив, корректная запись математических выражений в подобных случаях не только позволяет избежать бессмысленных (с точки зрения предметной области) выражений, но и открывает, как будет показано ниже, дополнительные возможности для математического моделирования в гуманитарных областях знаний.

В целях полноты изложения первоначально напомним некоторые моменты из истории математики и обратим внимание на некоторые важные для данной работы обстоятельства.

О размерных и абстрактных величинах

В любой предметной области всегда имеют дело с *именованными* и *размерными* величинами. При этом используют математический аппарат, разработанный для величин другого класса — *абстрактных* математических величин. Математические величины не имеют имен, для своей количественной характеристики не требуют выбора единиц измерения, а понятие «размерность величины» не имеет к ним отношения. Имена величин в предметной области определяются свойствами объекта рассмотрения, а размерность — еще и выбором системы единиц измерения.

Отметим, что в метрологической литературе используют термин «размерность величины» [9]; в физической же предпочитают говорить о «размерности единицы измерения» [5]. Основоположник методологии анализа размерностей Ж. Фурье интересовался изменениями одних единиц измерения при изменении других. Однако при конкретном анализе удобно говорить о размерности величин.

Указанные отличия математических величин от величин, используемых в предметных областях, вполне очевидны.

Действительно, если обратиться к истокам математической науки, то нетрудно обнаружить следующее. Потребность в счете объектов реального мира привела к появлению натуральных чисел. Использование их при счете сопровождалось добавлением имени соответствующих объектов счета (5 яблок; 5 барабанов; 2 кувшина).

Умная голова обнаружила, что результат счета одноименных объектов после операции их физического объединения может быть получен без выполнения самой операции объединения. Для этого достаточно выполнить операцию сложения соответствующих *именованных* чисел. По всей видимости, этот скачок из мира реальных субстанций в мир абстрактного был одним из первых в истории человечества. Дальше — больше. Обнаруженная инвариантность операции сложения именованных чисел в отношении их имен положила начало арифметике. Обнаруженная позже инвариантность некоторых операций и в отношении самих чисел привела к понятию «величина» (абстрактная математическая величина) и появлению алгебры.

Математика приобрела статус самостоятельной научной дисциплины. Позже появился функциональный анализ и др. Согласно характеристике, данной А.Н. Колмогоровым, объектами математических исследований XX столетия стали «...возможные математические конструкты». В арсенале математики появились многочисленные операции над *её* объектами, над *абстрактными* числами и *абстрактными* математическими величинами.

Корректность выполнения некоторых из этих операций над *именованными* и *размерными* величинами, на наш взгляд, заслуживает обсуждения.

Вероятно, впервые на этот вопрос обратили внимание идеологи математического подхода в теории измерений Суппес и Зинес [3]. На первых же страницах своей монографии они недоумевают: «В большинстве случаев читатель сталкивается с набором противоречивых и сбивающих с толку догм, объявляющих допустимым... выполнение тех или иных правил. Обучая человека началам науки, мы предупреждаем его, что «не имеет смысла» складывать числа, относящиеся к разным свойствам, скажем к весу и росту, но в то же время предлагаем изучающим физику умножать числа, связанные с такими понятиями, как скорость и время, или делить меру расстояния на меру времени. Почему же умножение «более осмыслено», чем сложение?».

Поставив важный для математического моделирования вопрос, они, к сожалению, не дали на него ответа. После некоторых рассуждений попытаемся ответить на него.

О математических операциях с размерными величинами

По всей видимости, математические операции можно разделить на две группы.

Одни из операций — аналоги действий над объектами реального мира. Например, *сложение* имеет своим аналогом объединение однородных, одноименных объектов и их долей в целое; *деление* — это аналог разделения целого на однородные и одноименные доли. Эти операции можно отнести к *содержательным* операциям. Когда мы

делим *3 арбуза на 5 едоков* ($\frac{3 \text{ арбуза}}{5 \text{ едоков}} = ?$), то очевидно получаем количество *арбуза* на одного *едока*.

Или, когда делим пройденный телом путь (*S*) на затраченное для этого время (*Δt*), то получаем среднюю скорость (*v*), т. е. путь, пройденный за единицу времени. Другими словами можно сказать, что при делении разноименных количеств получаем количество «числителя», приходящееся на единицу «знаменателя».

Другие же операции не имеют аналогов в мире вещей. Например, логарифмирование, возведение в степень и др. Их можно отнести к *формальным* операциям.

Еще в начальной школе в самом начале изучения математики обращается внимание учащихся на недопустимость сложения *разноименных* чисел и величин. Вводят понятие *отвлеченного (математического)* числа, а позже и математической величины. В дальнейшем при изучении математики имеют дело с *абстрактными* величинами и числами, формируя и развивая способность учащихся к *абстрактному мышлению*.

О существовании именованных величин и чисел вспоминают лишь при изучении физики и обращают внимание учащихся на корректность математических операций с ними. Вводят запрет на одни операции, вводят ограничения на другие и допускают неограниченное использование третьих. Например, запрещена операция возведения в степень, если показатель степени — именованная (точнее сказать, размерная) величина; запрещено распространение действия оператора логарифмирования на именованные (размерные) величины. Операция сложения (вычитания) допустима только лишь в отношении одноименных количеств и не допустима в отношении разноименных, в то время как

операция деления (умножения) подобных ограничений не имеет. Можно сказать, обнаруживается инвариантность одних математических операций в отношении абстрактных и именованных количеств и неинвариантность других. В этой ситуации можно говорить о математическом «неравноправии» абстрактных и именованных величин. Можно так же говорить и о разных классах величин и чисел, рассматриваемых, с одной стороны, в математике и, с другой, — в предметных областях.

В этой связи представляется весьма целесообразным предложение Н.Р. Кемпбелла [4] об использовании в репрезентативной теории измерений трех различных понятий: 1) числового знака, или *нумерал* (numeral); 2) *физическое число* (physical number); 3) *число* (number) в полном математическом объеме этого понятия (обзор основополагающих работ теории дан в статье [10]). Кемпбелл занимался проблемами измерений в физике. В других предметных областях можно говорить и о других числах и величинах: об *экономических* числах и величинах, о *психологических* числах и величинах и т. д.

При этом следует иметь в виду не только вещественные числа, но и комплексные числа, квaternionные числа, октионные и др.

Для нумералов Кемпбелл определял лишь отношения эквивалентности и порядка. Благодаря этому нумералы могут быть именами индивидуальных объектов (номер игрока на его футболке, номер квартиры и т. п.). Порядок — общее свойство нумералов и математических вещественных чисел, он позволяет нумералам изображать математические числа.

К физическим Кемпбелл относил числа, применяемые при счете, т. е. именованные. При счете мы говорим: *5 чашек, 21 рубль* и т. д. Называя результат измерения (указывая, например, длину стержня 5,32 м), по-существу, тоже говорят о результате счета, но с использованием не натуральных, а вещественных чисел.

В предметных областях при написании математических выражений с именованными величинами следует не забывать, что не все математические операции с ними допустимы. Например, оператор логарифмирования не может быть применен к именованным количествам (числа, величины), как не могут быть именованными (точнее сказать, размерными) показатели степени, аргументы тригонометрических функ-



ций и др. Не имеет смысла сравнивать (равно; больше; меньше) разноименные количества в той или иной предметной области. Математика дала дефиниции операциям только над абстрактными числами и величинами.

Возвращаясь к недоумению Суппеса и Зинеса [3], упомянутому выше, на их вопрос о «большой осмысленности» операций деления и умножения можно дать следующий ответ: через операции деления и умножения разноименных величин предметной области, во-первых, даны дефиниции других величин, поэтому они и более осмысленны; с помощью этих операций установлены количественные связи между величинами, отображающими свойства объектов реального мира, другими словами, установлены физические законы природы. Вот примеры: скорость движения определяют как производную от

радиус-вектора ($\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$), иными словами, как отношение (операция деления) бесконечно малого приращения радиус-вектора и бесконечно малого приращения времени; второй закон Нью-

тона ($\vec{w} = \frac{\vec{F}}{m}$); массовый расход топлива ($\chi = \frac{m}{t}$);

плотность однородного вещества ($\rho = \frac{m}{V}$) и т. п.

О формальной верификации математических моделей

Введение Ж. Фурье понятия «размерность» (в монографии «Аналитическая теория тепла», 1822 г.) оказалось весьма плодотворным. Разработанная позже методология анализа размерностей в уравнениях математических моделей физики дает возможность, прежде всего, выявлять бессмысленные с точки зрения предметной области математические выражения, т. е. проводить формальную верификацию уравнений модели (содержательную верификацию проводят, как известно, сопоставлением с эмпирическими данными).

Анализ размерностей дает также возможность определять вид функциональных связей между величинами [5]. На его основе, как известно, разработан метод подобия.

В практике математического моделирования в технических науках и в физике формальная верификация (анализ размерностей) давно пре-

вратилась в рутинную процедуру, о которой и говорят-то лишь на учебных занятиях. Это стало возможным благодаря достигнутым договоренностям относительно единиц измерений и систем единиц измерений физических и технических величин. Ведь само понятие «размерность величины» имеет смысл в той или иной *системе* единиц измерений и неразрывно связано с ее основными единицами.

Однако, например, в экономико-математическом моделировании методология анализа размерностей не получила должного распространения, несмотря на осознание важности ее для экономической теории [2]. Монографию [6], рекомендованную к переводу на русский язык еще в 1970 году [7], не найти в библиотеках России, хотя бы и на английском языке, даже в 2011 году.

Парadox размерности

В практике математического моделирования, оперируя с именованными и размерными величинами предметной области, нередко записывают математические выражения, содержащие операторы, которые не определены математической наукой в отношении размерных величин.

Например, оператор логарифмирования записывают в решении дифференциального уравнения вида

$$dy = Aydx, \quad (1)$$

которое используют рассматривая радиоактивный распад ядер, поглощение света в толще вещества, разряд конденсатора и др. В этих случаях абстрактные величины в формуле (1) становятся именованными и размерными. Причем каждая из них может быть представлена различными именованными числами в зависимости от выбранных единиц измерения и иметь разные размерности в зависимости от выбора *системы единиц измерения*.

Например, в случае радиоактивного распада: y — это число ядер в системе, x — время. Тогда в соответствии с уравнением (1) коэффициент A имеет размерность ($\dim A$), обратную размерности времени, т. е. в системе СИ $\dim A = T^{-1}$.

В случае поглощения света: y — это интенсивность света, x — координата, выраженная в единицах длины (м, см или др.). Коэффициент A в этом случае имеет размерность, обратную размерности длины (L), т. е. в системе СИ $\dim A = L^{-1}$.

Математическое выражение для решения уравнения (1), как известно, имеет вид

$$\ln y = Ax + C, \quad (2)$$

где C — произвольная константа.

Для определения константы интегрирования необходимы дополнительные сведения об объекте моделирования в виде так называемых начальных (или граничных) условий. Их, как известно, подставляют в решение (2).

В предметной области при такой подстановке возникает естественный вопрос. В каких единицах следует использовать численные значения величин?

Действительно, найти, например, $\ln(28)$ или $\ln(2800)$ нетрудно. При этом очевидно получим, что $\ln(28) < \ln(2800)$. Но как найти $\ln(28 \text{ м})$ или $\ln(2800 \text{ см})$? Неужели $\ln(28 \text{ м}) \neq \ln(2800 \text{ см})$? Ведь $28 \text{ м} = 2800 \text{ см}$.

Ответов на подобные вопросы не существует. Логарифмирование размерных величин, как и другие математические операции с ними, не предмет математических исследований, записывать $\ln(28 \text{ м})$ или $\ln(2800 \text{ см})$ математически некорректно.

Несмотря на это, как известно, такая практика распространена. «Забывают» о существовании единиц измерения величин, «забывают» о размерностях этих единиц и без каких либо на то оснований «отбрасывают» наименования величин, проводя преобразования и вычисления. Полученному результату также без каких либо обоснований вновь приписывают отброшенные атрибуты. Удивительно, но полученный таким образом результат адекватно отображает моделируемую реальность. Совершаются две математически не обоснованные операции, если не сказать, две ошибки, а результат получается правильным. Эту ситуацию можно называть «парадокс размерности».

Подобная ситуация возникает и в отношении константы интегрирования другого дифференциального уравнения:

$$dy = A \frac{dx}{x}, \quad (3)$$

решение которого, как известно, имеет вид

$$y = A \ln(x) + C. \quad (4)$$

Если же не «забывать», что объекты математических исследований — это абстрактные ве-

личины и числа, то записывать логарифм именованной величины математически не корректно. Значит, и в предметной области записывать решение дифференциального уравнения в форме (2) или (4) математически некорректно.

К некорректным математическим операциям с размерными величинами относятся также и другие. Это: сложение (вычитание) величин *разной* размерности; возвведение в степень, если показатель степени величина *размерная*; тригонометрические функции *размерного* аргумента.

А вот операции умножения и деления величин *разной* размерности к таковым не относятся, о чем уже говорилось выше.

Отметим, что в любой системе единиц измерения плоский угол — безразмерная величина, т.к. количественно он определяется отношением длины дуги окружности с центром в его вершине к радиусу этой окружности. Единицами же измерения угла могут быть и полный угол, и развернутый угол, и прямой угол, и $1/360$ часть полного угла (угловой градус), и $1/100$ часть полного угла (артillerийский градус), и $1/2\pi$ часть полного угла (радиан) и др. Безразмерным является и пространственный угол.

Размерность констант интегрирования

Следует отметить, что в предметной области постоянная интегрирования C тоже имеет размерность, что вполне естественно. Причем *тождественные* математические преобразования приводят к *изменению* ее размерности. В этом нетрудно убедиться на следующем примере.

Ориентируясь на правую часть выражения (2), можно сказать, что C — величина безразмерная, то есть

$$\dim C = 1. \quad (5)$$

Это следует из того, что в выражении (2) $\dim C = \dim(Ax)$, а любая величина и ее приращение имеют одинаковую размерность ($\dim(x) = \dim(dx)$). В соответствии с исходным дифференциальным уравнением (1) $\dim(dx) = \dim^{-1} A(dx)$. Следовательно, $\dim(Ax) = 1$, а значит и $\dim C = 1$.

Если же провести *тождественные математические преобразования* и в силу произвольности постоянной интегрирования в выражении (2) вместо безразмерной величины C взять другую безразмерную величину — D , такую, что

$$\ln D = C, \quad (6)$$



то вместо уравнения (2) получим

$$\ln \frac{y}{D} = Ax. \quad (7)$$

В этом выражении, как и всегда, под оператором логарифмирования должна стоять безразмерная величина, поэтому $\dim D = \dim y$. При этом в предметной области величина y — не безразмерная ($\dim y \neq 1$). Следовательно, $\dim D \neq 1$, что не совпадает с выражением (5). Это означает, что при тождественных математических преобразованиях изменилась размерность константы интегрирования.

Возникает новый вопрос. Можно ли подобные преобразования с размерными величинами считать тождественными? Но ведь их часто проводят и получают адекватные результаты. Снова парадокс размерности.

Как избежать математических некорректностей

Избежать некорректных записей математических выражений с именованными величинами, например таких, как в выражениях (2) и (4), нетрудно, если воспользоваться математически допустимой произвольностью константы интегрирования. Так, если в выражении (2) константу C представить как $(\ln D)$, то приходим к другому виду решения уравнения (1):

$$y = D \exp(Ax). \quad (8)$$

Здесь некорректные операции с размерными величинами уже отсутствуют. Показатель степени (Ax) — величина безразмерная, а произведение размерной величины D на безразмерную экспоненту математически корректно.

Аналогично, если в выражении (4) константу C представить как $(-A \ln D)$, то можно записать выражение

$$y = A \ln \frac{x}{D}. \quad (9)$$

в котором также некорректные операции с размерными величинами отсутствуют, если $\dim x = \dim D$. В этом случае оператор логарифмирования применен к безразмерному отношению $(\frac{x}{D})$.

Таким образом, соответствующим выбором константы интегрирования можно избежать некорректных выражений в решениях дифференциальных уравнений.

О целесообразности корректной записи выражений с размерными величинами

С pragматической точки зрения о парадоксе размерностей и размерностях констант интегрирования можно было бы и не говорить, поскольку результаты моделирования получаются адекватными реальности.

Однако обратим внимание на важное обстоятельство, касающееся *интерпретации* констант интегрирования дифференциальных уравнений с размерными величинами.

Нетрудно заметить, что вид математического выражения, представляющего собою это решение, если оно математически корректно в отношении размерных величин, облегчает интерпретацию появившихся в процессе интегрирования констант.

Убедимся в этом на нескольких примерах.

1. Рассмотрим простейшую модель колебательного движения тела массой m под действием возвращающей силы $\vec{F} = -k\vec{x}$. Соответствующее дифференциальное уравнение, как известно, имеет вид

$$\frac{d^2y}{dt^2} + \frac{k}{m}y = 0. \quad (10)$$

Результат его интегрирования можно представить в двух вариантах:

$$y = C_1 \cos \sqrt{\frac{k}{m}}t + C_2 \sin \sqrt{\frac{k}{m}}t \quad (11)$$

и

$$y = D_1 \sin \left(\sqrt{\frac{k}{m}}t + D_2 \right), \quad (12)$$

в каждом из которых по две произвольные константы интегрирования: константы C_1 и C_2 в выражении (11) и константы D_1 и D_2 в выражении (12). Оба эти выражения математически корректны в отношении размерных величин, если $\dim C_1 = \dim y$, $\dim C_2 = \dim y$, $\dim D = \dim y$, а $\dim D_2 = 1$. С помощью математически тождественных преобразований от одного вида нетрудно перейти к другому.

Однако, *интерпретация* констант интегрирования в выражениях (11) и (12) разная. Так, если в выражении (11) C_1 и C_2 — это амплитуды гармонических составляющих сложного колебания, то в формуле (12) константа D_1 — это ам-

плитуда простого гармонического колебания, а D_2 — его начальная фаза. На этом примере видно, что выбор формы записи решения дифференциального уравнения позволяет даже *расширить понятийный аппарат* в отношении объекта моделирования. В данном примере появилась возможность говорить о фазе и начальной фазе колебаний, чего не было в исходном дифференциальном уравнении (10).

Следует заметить, что для интерпретации констант интегрирования ни в одном, ни в другом случае нам не потребовались ни граничные, ни начальные условия. Достаточно было лишь математических свойств полученных выражений.

2. Рассмотрим решение уравнения (1). Если в этом качестве использовать выражение (8), то исходя из свойств экспоненциальной функции ($\exp(0)=1$) нетрудно видеть, что $D = y|_{x=0}$, т. е. это значение функции при нулевом значении аргумента. Сдвиг начала отсчета аргумента (например, при использовании шкалы интервалов для измерения x) на величину a (то есть замена $x = \hat{x} + a$) приведет лишь к изменению предэкспоненциального множителя D в $\exp(a)$ раз. При этом смысл D сохраняется.

Если же в качестве решения использовать математически некорректное в отношении размерных величин выражение (2), то по поводу смысла константы интегрирования C сказать нечего.

На этом примере видно, что корректная в отношении размерностей запись математических выражений дает возможность интерпретировать константу интегрирования, основываясь только на свойствах функции и не касаясь граничных или начальных условий рассматриваемой задачи, не имея эмпирической информации об объекте моделирования.

3. С решением уравнения (3) ситуация аналогичная. Если решение использовать в виде выражения (9), то нетрудно интерпретировать константу интегрирования на основе свойств логарифмической функции — при переходе аргумента через значение, равное единице, изменяется знак функции. Причем изменение масштаба аргумента (замена $x = b\hat{x}$) приводит только к увеличению численного значения функции, выраженного в единицах A . Это увеличе-

ние на $\ln b$ не изменяет смысл константы C как значение аргумента, при котором происходит изменение знака функции. В свою очередь измерение знака можно связывать с качественными изменениями переменных в интересующей системе.

Здесь, как и в предыдущих случаях, при интерпретации использованы только математические свойства функций.

При использовании в качестве решения уравнения (3) математически некорректного в отношении размерных величин выражения (4) по поводу смысла константы интегрирования сказать нечего.

Приведенные примеры дают основание высказать следующее утверждение, относящееся к математическим моделям с дифференциальными уравнениями:

Если решение дифференциального уравнения модели записано математически корректно в отношении размерных величин, то даже при невозможности определить константу интегрирования (отсутствуют начальные или граничные условия) сохраняется возможность интерпретировать ее на основе математических свойств полученной функции. Ее математические свойства «подсказывают» интерпретацию появившихся в процессе решения констант, которые в этой ситуации приобретают статус новых параметров модели, не содержащихся в исходной дифференциальной модели(). Это в свою очередь расширяет понятийный аппарат, относящийся к объекту моделирования, и открывает новую перспективу для исследований.

Пример продуктивного использования анализа размерностей

На достоинства и целесообразность корректной записи математических выражений с именованными и размерными величинами мы обратили внимание при поиске уравнения связи между интенсивностью ощущений индивида (полезностью U), вызванных потреблением благ, и количествами этих благ (x_i). Это уравнение в экономической теории принято называть, как известно, уравнением кардиналистской (количественной) полезности.

Подробнее о проблеме получения количественного уравнения полезности сказано в нашей работе [8]. В ней дано психофизическое



обоснование дифференциальному уравнению полезности (аналогичное выражению (3)). Графических условий для определения константы интегрирования взять было негде, так как психофизика, психологическая наука пока еще не предложили метода количественной оценки ощущений удовлетворения по шкале отношений. Воспользовавшись математической произвольностью константы интегрирования, она была представлена в нетрадиционной для чистой математики форме, отвечающей требованиям корректной записи математического выражения с именованными величинами (решение записали в виде, аналогичном выражению (9)).

В результате впервые в теории потребительского спроса было получено *двухпараметрическое кардиналистское уравнение полезности*

$$U = \sum_{i=1}^N k_i \ln \frac{x_i}{x_{0i}}. \quad (13)$$

Оно содержит **два параметра** — k_i и x_{0i} , один из которых (x_{0i}) как раз и является константой интегрирования, имеющей ясный психофизический смысл. Она представляет собой количественный уровень потребления блага, при котором ощущения удовлетворения и раздражения сменяют друг друга. Этот уровень в работах [8] и [11] назван уровнем нейтрального потребления.

Вместо заключения

По нашему опыту, обсуждения (и не только в СПбГПУ) отдельных фрагментов данной работы с представителями физико-технических,

математических и гуманитарных знаний показали, что для первых анализ размерностей в уравнениях математической модели — рабочий инструмент. Студенты и аспиранты владеют им в достаточной мере. Математики относятся к анализу размерностей с безразличием, полагая, что их задача — научить студентов технике выполнения математических операций, естественно, с абстрактными математическими величинами. По их мнению, «ответственность» за корректное использование математического аппарата лежит на пользователях предметных областей знания. И это, безусловно, так. Гуманитарии старшего поколения вспоминают, что об этом говорили при изучении физики, а для выпускников школ, студентов и аспирантов гуманитарных направлений анализ размерностей оказался неведомой областью знаний. И это есть результат «урезания» естественно-научной составляющей в программе вузовской подготовки, о чем сказано в начале данной работы.

Полагаем, что обсуждаемые в статье вопросы должны найти место в программах подготовки выпускников системы высшего профессионального образования, в первую очередь — гуманитарных направлений, использующих математический аппарат. Для технических направлений сказанное в данной статье тоже может представлять интерес, но не более чем академический (например, то, где речь идет о парадоксе размерности).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-06-00319-а, «Математические модели поведения агентов рыночных отношений»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Allais, M. La science économique d'aujourd'hui et les faits [Текст] / M. Allais // Revue des Deux Mondes.— juin 1990.— Р. 54–74. (Перевод: Алле Морис. Современная экономическая наука и факты.— THESIS.— 1994. Вып. 4.)
2. Раяцкас Р.Л. Количественный анализ в экономике [Текст] / Р.Л. Раяцкас, М.К. Плакунов // М.: Наука, 1987.— 392 с.
3. Суппес П. Основы теории измерений [Текст] / П. Суппес, Дж. Зинес // Психологические измерения.— М., Мир, 1967.— 196 с.
4. Campbell N.R. An account of the principles of measurement and calculation [Текст] / N.R. Campbell.— London: Longmans, Green & Co, 1928.— 290 p; Cam-
pbell, N.R. Physics. The elements [Текст] / N.R. Camb-
bell.— Cambridge: University press, 1920.— 565 p.
5. Сена, Л.А. Единицы физических величин и их размерности [Текст] / Л.А. Сена.— М.: Наука, 1988.— 431с.
6. De Jong, F.J. Dimensional Analysis for Economists [Текст] / F.J. De Jong.— Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1967.— 220 p.
7. Гладышевский, А.И. Размерностный анализ для экономистов. [Текст] / А.И. Гладышевский Ф. Й. Де Йонг // Экономика и математические методы.— 1970. Т. VI. № 3.— С. 477–480.
8. Дмитриев, А.Г. Теория потребительского спроса: психофизическое обоснование дифференциаль-



ного уравнения кардиналистской полезности; интерпретация решения [Текст] / А.Г. Дмитриев, Т.А. Козелецкая, Е.А. Герман // Журнал экономической теории.— Екатеринбург: Изд-во Института экономики УрО РАН, 2011.— № 1. С. 45–53.

9. Чертов, А.Г. Физические величины (терминология, определения, обозначения, размерности, единицы) [Текст]: Справ. пособие / А.Г. Чер-

тов.— М., Высш. шк., 1990.— 335 с.

10. Кнорринг, В.Г. Развитие репрезентативной теории измерений [Текст] / В.Г. Кнорринг // Измерения, контроль, автоматизация. 1980. № 11–12 (33–34).— С. 3–9.

11. Козелецкая, Т.А. Модели экономического поведения индивида [Текст]: Дисс. ... канд. экон. наук / Т.А. Козелецкая.— Спб, 2005.— 159 с.

ХРОНИКА СОБЫТИЙ

УДК 001

Ю.С. Васильев

ИНЖЕНЕР И УЧЕНЫЙ НИКОЛАЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ МАЛЫШЕВ

6 декабря 2011 года исполнилось 100 лет со дня рождения Николая Александровича Малышева — выдающегося советского, российского инженера-гидротехника. Он окончил 4-ю Нижегородскую школу и поступил в 1929 году на дорожное отделение строительного факультета Нижегородского государственного университета, но в 1930-м перешел в Ленинградский гидротехнический институт, который позже вошел в состав Индустриального (затем Политехнического).

В архиве СПбГПУ хранится личное дело студента Н.А. Малышева, в котором имеется протокол № 1 Государственной квалификационной комиссии от 3 марта 1934 г. В нем приводится следующая запись:

«СЛУШАЛИ: Защиту дипломного проекта студента V курса Малышева Н.А. на тему: «Проект узла сооружений Васильевской ГЭС на р. Волге».

ПОСТАНОВИЛИ: Заслушав доклад студента V курса Малышева по исполненному проекту «Сооружение Васильевского узла на р. Волге», выполненному под руководством академика Н.Н. Павловского, ответы на вопросы и отзывы руководителя, прилагаемые в письменной форме, Государственная квалификационная комиссия постановила: признать проект и защиту отличными. Комиссия отмечает работу Малышева как работу исключительную по качеству и постановляет: присвоить Малышеву Н.А. звание инженера-гидротехника.

Председатель Б. Галёркин

Члены комиссии (подписи)»

По окончании вуза Н.А. Малышев был направлен на строительство Рыбинского гидроузла на р. Волге, где прошел путь от инженера до начальника проектного отдела.

В начале Великой Отечественной войны возглавлял Управление оборонительных работ рай-

она, затем был переведен на строительство Тагильского металлургического завода, Широковской и Понышевской ГЭС. После войны он принимал участие в восстановлении разрушенных объектов, в должности главного инженера руководил восстановлением Беломоро-Балтийского канала.

Через 3 года после окончания войны Н.А. Малышева назначают начальником бюро и главным инженером проекта Волго-Балтийского водного пути в институте «Гидропроект» Главгидростроя МВД СССР. В 1950 году он возглавил бюро по проектированию Куйбышевской (ныне Жигулевской) ГЭС.

По окончании строительства этого крупнейшего гидроузла на Волге ему как главному инженеру проекта было присвоено звание Героя Социалистического Труда. Оценив его эрудицию, выдающиеся способности организатора и деловые качества, в 1952 году его назначают заместителем начальника и главным инженером института «Гидропроект» — крупнейшей в мире



Н.А. Малышев

проектной и научно-исследовательской организацией. В «Гидропроекте» она проработал до 1995 года, создав целую научную школу специалистов по проектированию крупных ГЭС.

В 1959 году Н.А. Малышев получает дополнительные обязанности главного инженера проекта высотной Асуанской плотины в Египте. По оценке ряда авторитетных международных организаций, включая ЮНЕСКО, реализация этого проекта — самое важное техническое достижение в строительстве XX века. Осуществление проекта высотной Асуанской плотины на Ниле принесло заслуженную славу всей советской гидротехнике и гидроэнергетике. Затем Николай Александрович руководил проектными работами для зарубежных гидроэнергетических объектов в Анголе, Вьетнаме, Камбодже, Индии, Индонезии, Марокко, Сирии, Анголе и других странах.

В течение многих десятилетий он был крупнейшим авторитетом при решении сложнейших проблем гидроэнергетического и водохозяйственного строительства, экспертом мирового класса. Его неоднократно приглашали международные организации и правительства разных стран для работы в экспертных комиссиях по

рассмотрению технических решений в проектах гидроузлов и справедливому распределению трансграничных водных ресурсов. Зарубежные коллеги называли Н.А. Малышева живым классиком плотиностроения. Имя Н.А. Малышева носит одна из улиц г. Асуана.

23 декабря 1976 года Н.А. Малышев был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР по Отделению физико-технических проблем энергетики. Его многогранная деятельность была высоко оценена государством. Он был награжден двумя орденами Ленина, орденом Октябрьской революции, двумя орденами Трудового Красного Знамени, орденом «Знак Почета». Он был лауреатом Государственной премии в области науки и техники, имел звание «Почетный энергетик СССР».

Николай Александрович Малышев обладал выдающимися способностями и большой инженерной и научной эрудицией, был великолепным организатором и заслуженно пользовался большим авторитетом среди широких кругов проектировщиков, строителей и научных работников как в нашей стране, так и за рубежом.

Скончался Николай Александрович Малышев скромно 13 марта 2005 года в Москве.



ПОЛИТЕХНИКИ — ТРИЖДЫ ГЕРОИ СОЦИАЛИСТИЧЕСКОГО ТРУДА



Я.Б. Зельдович (1904–1987) — выдающийся советский физик-теоретик, крупный специалист в области теории горения и детонации, физики взрыва и ударных волн, ядерной физики и элементарных частиц, теории гравитации и космологии, астрофизики высоких энергий и рентгеновской астрономии, действительный член Академии наук СССР; соратник И.В. Курчатова, ученик и друг Ю.Б. Харитона, трижды Герой Социалистического Труда (1949, 1954, 1957), лауреат Ленинской (1957), четырех Сталинских (1943, 1949, 1951, 1953) премий, кавалер трех орденов Ленина (1949, 1962, 1974), ордена Октябрьской Революции (1984) и двух орденов Трудового Красного Знамени (1945, 1964).

Он работал в Институте химической физики в Ленинграде (1931–1941), Казани (1941–1943), Москве (1943–1948), КБ-11 при Лаборатории № 2 Академии наук СССР (1948–1965), Институте прикладной математики (1965–1983), Институте физических проблем (1983–1987).

Яков Борисович в 1932–1935 годах в качестве вольнослушателя учился на инженерно-физическом (физико-механическом) факультете Ленинградского индустриального (политехнического) института.

УДК 001:929

Ф.П. Кесаманлы

АКАДЕМИК ЯКОВ БОРИСОВИЧ ЗЕЛЬДОВИЧ

Я.Б. Зельдович, несомненно, является одним из талантливейших физиков-теоретиков СССР. Особенno следует отметить большой цикл его работ в области теоретического исследования процессов горения. Эти работы являются лучшими и важнейшими в этой области не только в СССР, но и во всей мировой литературе.

Характерно для работ Зельдовича — широкое использование им, наряду с методами «обычной» теоретической физики, также и гидродинамики. Такое параллельное владение обеими областями — крайне редкое среди физиков-теоретиков — является характерной и очень ценной особенностью Зельдовича, делающей для него доступными вопросы, недоступные ни для гидродинамиков, ни для физиков-теоретиков «обычного» типа.

Следует отметить, что научная деятельность Зельдовича еще далеко не достигла своей высшей точки. Наоборот, его работы показывают непрекращающееся научное развитие.

Л.Д. Ландау [2, с. 392].

Эпиграф к настоящему очерку — это полный текст отзыва, написанного 6 июня 1946 года Л.Д. Ландау, о научной деятельности Я.Б. Зельдовича, вторично баллотировавшегося в члены-корреспонденты Академии наук СССР. На сей раз выборы прошли победно, и 32-летний Яков Борисович стал членом-корреспондентом АН СССР.

Первый раз, в 1938 году, когда он был еще кандидатом наук, Ученый совет Института химической физики во главе с академиком Н.Н. Семеновым единогласно выдвинул его в члены-корреспонденты Академии наук СССР (правда, в тот раз неудачно): «Успев в возрасте 24 лет уже столь много сделать для науки, продолжая все более интенсивно работать и расти, он, без со-

мнения, в дальнейшем обогатит науку еще более ценными результатами. Но уже и сейчас, независимо от его возраста, по качеству и количеству сделанного им он несомненно достоин звания члена-корреспондента Академии наук СССР» [2, с. 391].

В 1953 году, когда Яков Борисович первый раз баллотировался в действительные члены (академики) АН СССР, И. В. Курчатов в своем отзыве писал: «Одной характерной особенностью научного творчества Я. Б. Зельдовича является чрезвычайно широкий диапазон вопросов, над которыми он работал и работает. Он является автором значительного числа как экспериментальных, так и теоретических работ, посвященных явлениям адсорбции, химической кинетики, теории горения и детонации, газодинамики и ядерной физики.

Второй особенностью является умение находить сравнительно простые приближенные методы решения сложных задач.

Третьей особенностью является высокий теоретический уровень, на котором проведено решение разнообразных вопросов, ранее не поддававшихся количественной трактовке.

Наконец, четвертой важной особенностью творчества Я. Б. Зельдовича является исключительное умение направлять силу своего строгого и точного теоретического анализа на решение вопросов, имеющих важнейшее практическое значение.

...Я. Б. Зельдович является ученым именно такого типа, в которых нуждается Академия наук. Его избрание в число действительных членов Академии наук по физико-математическому отделению, несомненно, будет способствовать дальнейшему улучшению и оживлению работы отделения и направлению работы отделения на наиболее актуальные и важные для нашей Родины темы» [3, с. 76].

Академиком Я. Б. Зельдович стал в 1958 году в возрасте 44 лет, будучи уже в ранге трижды Героя Социалистического Труда и лауреата Ленинской и четырех Государственных премий.

Очень высоко отзывался о Якове Борисовиче его учитель и друг академик Ю. Б. Харiton: «Мне очень повезло в жизни: в течение примерно 25 лет я работал с фантастически интересным человеком и совершенно исключительным ученым — Яковом Борисовичем Зельдовичем. Широта его научных интересов поистине невероят-

ная: катализ, теория горения и детонации, адсорбция и наряду с этим — элементарные частицы и ядерная физика, астрофизика и космология, теория относительности и квантовая механика. И везде он был силен, универсален <...> Это был совершенно фантастический человек. Я преклоняюсь перед ним — как ученым и человеком» [3, с. 99, 107]. Действительно, научная деятельность Якова Борисовича была настолько многосторонна, что крупнейший английский физик и математик С. Хоукинг, знавший его работы по литературе, после знакомства и беседы с ним написал ему: «Теперь я знаю, что Вы — реальный человек, а не группа ученых, подобных Бурбаки» [11, с. 7].

Во вводной части первой книги избранных трудов, выпущенных к 70-летию Я. Б. Зельдовича, приведена подробная научная биография всего его творческого пути [11, с. 5–49], а в послесловии второй — научная автобиография [12, с. 435–446]. В настоящей статье мы приводим историко-биографический очерк о Якове Борисовиче.

Я. Б. Зельдович родился 23 февраля (8 марта) 1914 года в Минске в семье служащих.

Отец его — Борис Наумович Зельдович (1889–1943) — был юристом, членом Коллегии адвокатов.

Мать его — Анна Петровна Зельдович (урожденная Кивелиович) (1890–1975) — была переводчицей, членом Союза писателей.

Осенью 1914 года семья Зельдовичей переехала в Петроград. В 1924 году десятилетний Яша сразу поступил в третий класс средней школы, которую окончил в 1930 году. С осени 1930 по май 1931 года он учился на курсах и одновременно работал лаборантом в Институте обработки полезных ископаемых. В мае 1931 года перешел на такую же должность в Институт химической физики, с которым остался связанным всю свою жизнь.

Очень интересно рассказано об истории перехода молодого Якова Борисовича из одного института в другой в воспоминаниях профессора А. Б. Шехтер о нем: «В 1931 году в лабораторию катализа ЛИХВа, которой заведовал мой муж, Симон Залманович Рогинский, пришла экскурсия из учреждения, именуемого «Механобр». Среди взрослых и пожилых участников экскурсии, далеких по интересам и явно не улавливающих смысла излагаемых исследований по



теории катализа, выделялся 17-летний паренек, задававший вопросы, бьющие в самые ключевые точки работ.

К счастью, руководитель экскурсии научный сотрудник лаборатории катализа Л.А. Сена обратил внимание на юношу и немедленно повел его к С.З. Рогинскому.

Оказалось, молодой человек недавно окончил среднюю школу и был распределен в «Механприбор», где и работал лаборантом. Звали его Яша Зельдович.

После недолгого разговора с Яшой Симон Залманович, сразу распознавший его исключительные способности, в тот же день обратился к А.Ф. Иоффе, директору Комбината, в который входил ЛИХВ, с просьбой посодействовать через Наркомпрос о переводе Зельдовича на работу в наш институт.

Как известно, А.Ф. Иоффе, как никто другой, любил и умел «выуживать» таланты. И в этом случае он без всякой волокиты добился, чтобы 17-летний Зельдович стал сотрудником лаборатории катализа. Яша очень быстро вошел в курс тематики лаборатории и фактически стал соавтором ряда работ по теории гетерогенного катализа. Шло много споров о том, поступать ли Яше в вуз. Многие (С.З. Рогинский, Я.И. Френкель и др.) были против, считая, что Яша сам сможет приобрести нужные ему знания, а вуз только засушит его яркое дарование. Будущее показало, что они были правы. Старт, данный Яше в лаборатории катализа, был явно удачный» [3, с. 13, 14].

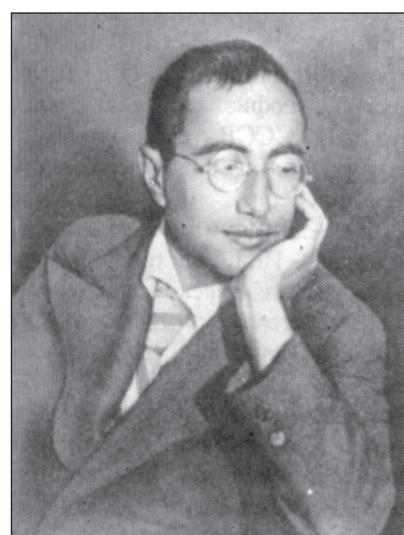
Начав работу в Институте химической физики без высшего образования, он занимался самообразованием под руководством теоретиков института, большинство из которых преподавали в Политехническом институте, в том числе и профессор С.З. Рогинский. Оформился в экспернат физико-математического факультета при ЛГУ, но не окончил его. С 1932 по 1935 год посещал лекции на физико-механическом факультете ЛПИ. В 1934 году выполнил фундаментальную работу по адсорбции и катализу. В том же году был принят в аспирантуру ЛИХВа, в 1936 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Вопросы адсорбции». В ее вошли экспериментальные и теоретические работы по катализу и адсорбции.

«В 1939 году Зельдович защитил докторскую диссертацию. Было ему тогда 25 лет. По этому

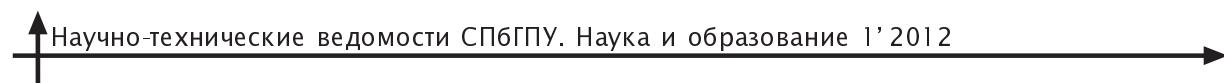


С отцом Борисом Наумовичем
и матерью Анной Петровной
Зельдовичами

повору у него в квартире, где он жил с матерью и сестрой, состоялся небольшой банкет, где было мало людей (Н.К. Семёнов, два оппонента — Я.К. Сыркин и А.Н. Фрумкин — и мы с Симоном Залмановичем), но много вина, и царило не-принужденное, веселое настроение. Фрумкин произнес шутливый тост и, обращаясь к Семёнову, сказал: «У тебя, Колька, все всегда бывает необыкновенно. Ну, скажи, кто в твоем институте в этом году защитил докторскую диссертацию?» И сам же ответил, указывая на Яшу и на меня: «один ребенок и одна женщина!» (моя докторская защита была в том же 1939 году). <...>



Ленинград, 1938 г.



Могу еще добавить, что со своей женой, Варварой Павловной Константиновой, Яша познакомился в лаборатории катализа, сотрудникей которой она была. Таким образом, в лаборатории катализа Зельдович получил путевку не только в науку, но и в семейную жизнь» [3, с. 14, 15].

Докторская диссертация Якова Борисовича — «Окисление азота» — была посвящена экспериментальным работам на лабораторных и укрупненных установках и теоретическим работам по окислению азота при горении и взрывах.

В 1941–1945 годах Я.Б. Зельдович совместно с Ю.Б. Харитоном занимался теорией деления урана. Вот, что пишет об этом Юлий Борисович: «Вместе мы начали работать в 1939 г. Тогда появилась первая статья о наблюдении деления ядер урана, авторами которой были О. Ган и Ф. Штрасман, а затем работа Л. Мейтнер и О. Фриша, объяснивших это явление делением урана под действием нейтронов. Прочитав об этом, мы поняли, что в данном случае возможны не обычные цепные реакции, а ядерные, которые могли бы быть и разветвленными, т. е. приводящими к ядерному взрыву с выделением огромной энергии. Дело в том, что в нашем институте много занимались вопросами, связанными с цепными реакциями. Директором института, Н.Н. Семёновым, была построена теория разветвленных цепных химических реакций. Поэтому нам было довольно легко перекинуть мостик к ядерным разветвленным реакциям, и мы договорились заняться этим вплотную.



В эвакуации. Казань, 1942 г.

Поначалу, поскольку в наши официальные научные планы это не входило (я занимался взрывчатыми веществами, организовал соответствующую лабораторию, у Якова Борисовича была утвержденная тема по адсорбции), то мы решили днем вести плановые работы, а по окончании рабочего дня заниматься исследованием возможности осуществления цепных ядерных реакций. Но довольно скоро поняли, что имеем дело с проблемой настолько важной, что необходимо сосредоточиться только на ней. Результатами мы делились с И.В. Курчатовым, который в Ленинградском физико-техническом институте, расположенному поблизости, руководил одной из лабораторий ядерной физики. Естественно, в курсе наших работ был и Н.Н. Семёнов; он быстро оценил несомненную важность новой проблемы, ее возможного влияния на ядерные взрывы...

В 1939–1940 годах мы с Яковом Борисовичем опубликовали три статьи в «Журнале экспериментальной и теоретической физики», а также обзорную статью в «УФН» и послали туда же вторую обзорную статью. В тот момент мы уже работали с И.И. Гуревичем. Нам удалось установить, что если с помощью обычных взрывчатых веществ произвести обжатие 10 кг урана-235 до более высокой плотности, возникнет разветвленная ядерная реакция, а при достаточно сильном обжатии — ядерный взрыв. Оценка критической массы (10 кг) вошла во вторую обзорную статью в «УФН», но оказалась довольно грубой, поскольку расчеты велись достаточно примитивно — в нашем распоряжении не было ЭВМ, да и экспериментальных данных не хватало. В результате мы ошиблись в пять раз (правильная цифра — 55 кг). Но несмотря на эту погрешность мы все равно были полны энтузиазма и, без сомнения, продолжили бы свои исследования по урановой проблеме, если бы не начавшаяся жестокая война с фашистской Германией» [3, с. 100, 101].

Вскоре после начала войны Институт химической физики был эвакуирован в Казань. Возникла задача детального анализа процессов, связанных с ракетным оружием — «катюшами». Теория горения пороха, достаточная для внутренней баллистики ствольной артиллерии, нуждалась в корректировке. Для камеры горения реактивного снаряда характерен деликатный баланс между приходом пороховых газов при горении и уходом их через сопло. Новые представления



о горении пороха, явление раздувания, открытое в ИХВ О.И. Лейпунским, роль прогретого слоя пороха — все это было непривычно для артиллеристов и получило различные оценки у пороховиков и специалистов по внутренней баллистике. В связи с работами по горению пороха группа Я.Б. Зельдовича была переведена в Москву.

Весной 1943 года Яков Борисович за работы по горению и детонации был удостоен Сталинской премии 2-й степени. Столь высокая награда совсем молодому человеку (29 лет), и не в коллективе, а индивидуально — случай исключительный.

В том же году правительство СССР приняло решение начать работы по созданию ядерного оружия. По рекомендации А.Ф. Иоффе общее научное руководство было поручено И.В. Курчатову. Курчатов, зная работы Ю.Б. Харитона и Я.Б. Зельдовича, предложил Харитону возглавить исследования по созданию конструкции ядерного заряда. Зельдович активно включился в комплекс работ. Некоторое время Юлий Борисович и Яков Борисович продолжали работы по традиционному оружию.

9 апреля 1946 года было принято секретное Постановление СМ СССР № 805-327сс «Вопросы лаборатории № 2», пункты 5 и 6 которого гласят:

«...Считать необходимым:

а) привлечь Институт химической физики АН СССР (директор акад. Семенов Н.Н.) к выполнению по заданиям Лаборатории № 2 (акад. Курчатова) расчетов, связанных с конструированием реактивных двигателей, к проведению измерений необходимых констант и подготовке к проведению основных испытаний реактивных двигателей;

б) организовать в Институте химической физики АН СССР разработку теоретических вопросов ядерного взрыва и горения и вопросов применения ядерного взрыва и горения в технике.

В связи с этим переключить все основные силы Института химической физики АН СССР на выполнение указанных задач.

6. Возложить на Первое главное управление при Совете Министров Союза СССР (т. Ванников) материально-техническое обеспечение работ КБ-11 и Института химической физики АН СССР.»

В 1946 году Зельдович был избран членом-корреспондентом АН СССР. С 1946 по 1948 год



В год избрания членом-корреспондентом АН СССР.
Москва, 1947 г.

он заведовал теоретическим отделом Института химической физики. Одновременно по 1948 год был профессором Инженерно-физического института.

С февраля 1948 по октябрь 1965 года работал в КБ-11 в Арзамасе-16 в должности заместителя научного руководителя и главного конструктора КБ Ю.Б. Харитона. Это были годы напряженной работы над созданием ядерно-ракетного щита страны. Якову Борисовичу часто приходилось ездить в Москву. Местными острословами обыгрывались его требовательность и постоянные поездки в Москву и обратно, где он руководил группами физиков:

«Что за тележка у дядюшки Якова —
Едет вперед и назад одинаково!»

И так как с отъездом Якова Борисовича несколько спадало напряжение в одной из групп, стихотворец отмечал:

«Пусть половина другая почешется,
Эта ж пока отдохнет и утешится...»

Яков Борисович был в числе основных создателей первой советской атомной бомбы с плутониевым зарядом, успешное испытание которой 29 августа 1949 года на Семипалатинском полигоне в казахстанской степи ликвидировало атомную монополию США. За участие в этой работе Постановлением Совета Министров



С сыном Борисом. 1954 г.

СССР № 5070—1944 с/оп от 29 октября 1949 года, подписаным И.Я. Сталиным, Яков Борисович, К.И. Щёлкин, В.И. Алфёров и Г.Н. Флёрдов были представлены к присвоению звания Героя Социалистического Труда, премированы 150 000 рублями, автомашиной «Победа» и дачей, построенной за счет государства, а также им было присвоено звание лауреата Сталинской премии первой степени.

После успешного испытания 24 сентября 1951 года на Семипалатинском полигоне атомной бомбы с урановым зарядом Я.Б. Зельдовичу была присуждена Сталинская премия первой

степени. Так он стал трижды лауреатом Сталинской премии.

Создание и успешное испытание 12 августа 1953 года на том же полигоне первой в мире водородной бомбы принесли Якову Борисовичу очередную Сталинскую премию первой степени, вторую золотую медаль «Серп и Молот» — соответственно звание дважды Героя Социалистического Труда.

В 1956 году был удостоен Ленинской премии, а в 1957 году его наградили третьей золотой медалью «Серп и Молот» и он стал трижды Героем Социалистического Труда.

С 1965 по январь 1983 год он заведовал отделом в Институте прикладной математики АН СССР. Одновременно стал профессором физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова и заведующим отделом релятивистской астрофизики Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга.

В 1977 году был назначен руководителем Научного совета по горению АН СССР, в 1983 году — заведующим отделом Института физических проблем АН СССР и консультантом дирекции Института космических исследований АН СССР.

Он был автором более 490 научных работ, в том числе двадцати основополагающих книг во многих областях физики и астрофизики. Общепризнано влияние работ Я.Б. Зельдовича на развитие науки во всем мире, многие из полученных им результатов стали классическими работами,



Я.Б. Зельдович, Ю.Б. Харiton и Н.Н. Семёнов на юбилее Института химической физики АН СССР. Москва, 1976 г.



С Ю.Б. Харитоном на общем «150-летнем» юбилее (80-летие ЮБ и 70-летие ЯБ).
Москва. ИХФ, 1984



а его монографии — учебниками, изучая которые в науку входят новые поколения ученых [10].

Яков Борисович был иностранным членом Лондонского королевского общества, Германской академии естествоиспытателей «Леопольдина» (ГДР), Американской академии наук и искусств, Национальной академии наук США, Венгерской академии наук, почетным членом ряда физических обществ и университетов, а также награжден почетными медалями: Н. Ман-

сона (1972) и им. Б. Льюиса (1984) за работы по газодинамике взрыва и ударным волнам; медалью имени И.В. Курчатова за открытия в ядерной физике (1977), Катарины Брюс за достижения в области астрономии (1983), медалью Международного центра теоретической физики им. П. Дирака (1985).

Умер Яков Борисович Зельдович 2 декабря 1987 года в Москве и похоронен на Новодевичьем кладбище.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Из истории ЛПИ, физ.-мех фак-т // Архив СПбГПУ: дело № 378. 1948.
2. **Зельдович, Я.Б.** Автобиография [Текст] / Зельдович Я.Б. // Физики о себе.— Л.: Наука, 1990.— С. 382–392.
3. Знакомый незнакомый Зельдович (в воспоминаниях друзей, коллег, учеников) [Текст].— М: Наука, 1994.— 352 с.
4. **Смелов, В.А.** Политехники — Герои Советского Союза. Герои Социалистического Труда [Текст] / В.А. Смелов.— Л.: Изд-во ЛПИ, 1989.— 106 с.
5. Атомный проект СССР: Документы и материалы [Текст]: в 3-х т. Т. 2. Атомная бомба 1945–1954. Кн. 1.— Москва— Саров: Наука, Физматлит, 1999.— 791 с.
6. **Щёлкин, Ф.К.** Апостолы атомного века. Воспоминания, размышления [Текст] / Ф.К. Щёлкин.— М: ДeLi принт, 2003.— 162 с.
7. **Смородинский, Е.А.** Яков Борисович Зельдович (к 50-летию со дня рождения) [Текст] / Е.А. Смородинский, Д.А. Франк-Каменецкий //
- Успехи физических наук.— 1964. Т. 82. Вып. 3 (март).— С. 567–574.
8. **Герштейн, С.С.** Яков Борисович Зельдович (к 60-летию со дня рождения) [Текст] / С.С. Герштейн [и др.] // Успехи физических наук.— 1974. Т. 112. Вып. 3 (март).— С. 533–540.
9. **Арнольд, В.И.** Яков Борисович Зельдович (к 70-летию со дня рождения) [Текст] / В.И. Арнольд [и др.] // Успехи физических наук.— 1984. Т. 142. Вып. 3 (март).— С. 531–532.
10. **Александров, А.П.** Памяти Якова Борисовича Зельдовича [Текст] / А.П. Александров [и др.] // Успехи физических наук, 1988. Т. 155. Вып. 4 (август).— С. 729–730.
11. **Зельдович, Я.Б.** Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика [Текст] / Я.Б. Зельдович; Под ред. акад. Ю.Б. Харитона.— М.: Наука, 1984.— 374 с.
12. **Зельдович, Я.Б.** Избранные труды. Частицы, ядра, Вселенная [Текст] / Я.Б. Зельдович; Под ред. Ю.Б. Харитона.— М.: Наука, 1985.— 464 с.

УДК 001:929

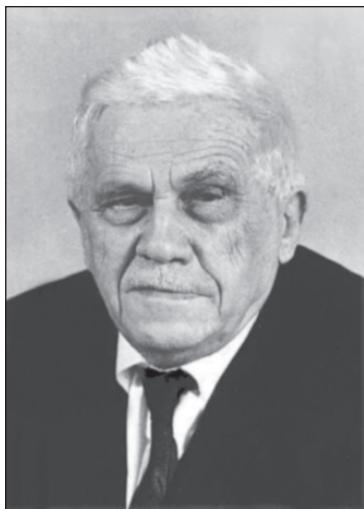
А.Г. Морачевский

АКАДЕМИК НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ БЕЛОВ (К 120-летию со дня рождения)

Академик Николай Васильевич Белов был выдающимся российским ученым в области кристаллографии, кристаллохимии и геохимии. Он обладал глубокими знаниями в математике, химии, минералогии. В руководимых им лабораториях определены кристаллические структуры свыше 500 химических соединений, главным

образом, минералов. Научные заслуги Н.В. Белова признаны всем мировым сообществом, ряд лет он возглавлял Международный союз кристаллографов.

Н.В. Белов родился 14 декабря 1891 года в городе Янове бывшей Люблинской губернии (Польша), где его отец, врач, проходил стажи-



Николай Васильевич Белов

ровку после окончания медицинского отделения Киевского университета. Позднее семья переехала в г. Ровно, а затем уже постоянно жила в г. Овруч Волынской губернии (ныне Житомирская область), на Украине. Будущий ученый окончил с золотой медалью Первую Варшавскую мужскую (русскую) гимназию, которая считалась очень хорошим учебным заведением, и поступил в 1910 году на металлургическое отделение (электрохимическое подотделение) Санкт-Петербургского политехнического института имени императора Петра Великого. Среди тех, чьи лекции слушал Н.В. Белов, были известные ученые Н.С. Курнаков (1860–1929, академик с 1913 г.), В.А. Кистяковский (1865–1952, академик с 1929 г.), А.А. Байков (1870–1946, академик с 1932 г.), Ф.Ю. Левинсон-Лессинг (1861–1939, академик с 1925 г.), Д.С. Белянкин (1876–1953, профессор с 1920 г., академик с 1943 г.), П.П. Федотьев (1864–1934, член-корреспондент АН СССР с 1933 г.). Как отмечал сам Н.В. Белов, большое впечатление на него оказали лекции тогда еще молодого преподавателя физики А.И. Иоффе (1880–1960, академик с 1920 г.). Н.В. Белов считал себя учеником А.Ф. Иоффе.

Первая мировая война (1914–1918 гг.), события гражданской войны, введение немецких войск на Украину — все это привело к тому, что Н.В. Белов закончил образованный в 1919 году химический факультет Петроградского политехнического института только в 1921 году, выпол-

нив в лаборатории физической химии свою дипломную работу на тему «О термических коэффициентах гальванических ячеек» и успешно защитив ее. В то время В.А. Кистяковский был в затянувшейся командировке на Северном Кавказе, и лабораторией физической химии руководил В.А. Суходский (1884–1967). Н.В. Белов закончил институт с квалификацией инженера-химика по электрохимической специальности.

В 1921 году Н.В. Белов вернулся в г. Овруч, где жили его родители и где еще до окончания института он занимал различные должности преимущественно в органах местного самоуправления. В 1924 году он вместе с женой переезжает в Ленинград в надежде получить работу по специальности, ему было уже 33 года. Время для поисков работы было не очень подходящим, и Н.В. Белову удалось устроиться только в лабораторию обувной фабрики «Скороход». Позднее Н.В. Белов был переведен химиком в Центральную лабораторию Ленинградского кожевенного треста, где он работал до конца 1935 года, занимая последовательно должности старшего химика, помощника заведующего и заведующего этой лабораторией.

Но Н.В. Белова прежде всего интересовала наука в самом широком плане, он внимательно следил за новейшими достижениями в области физики и химии, много читал, по совету одного из коллег стал сотрудничать с журналом «Природа». В течение 1928–1932 годов Н.В. Белов опубликовал в нем 72 научно-популярных статьи, в основном в области физики. С гимназического возраста он свободно владел английским, французским, немецким и польским языками, что очень облегчило ему литературную деятельность. В эти годы Н.В. Белов сближается с одним из редакторов журнала «Природа» академиком А.Е. Ферсманом (1993–1945), директором Минералогического музея АН СССР (в 1919–1930 гг.), автором фундаментальных трудов в области геохимии и минералогии, блестявшим популяризатором науки, ближайшим учеником и сотрудником академика В.И. Вернадского [1, 2].

Знакомство с А.Е. Ферсманом, переросшее в самые дружественные отношения, оказалось огромное, возможно, решающее влияние на дальнейшую судьбу Н.В. Белова. В 1930 году, когда образован Государственный комитет по химизации народного хозяйства, а его уполномо-



ченным по Ленинграду стал А. Е. Ферсман, который включил Н. В. Белова в организованную по линии Комитета академическую группу и поручил ему разработку проблемы использования нефелина.

Одной из важнейших народно-хозяйственных проблем тех лет, которой в числе других проблем занимался в те годы А. Е. Ферсман, было комплексное освоение природных богатств Кольского полуострова, прежде всего полезных ископаемых Хибинского массива [3]. Основными компонентами добываемой на комбинате «Апатит» руды являются минералы апатит и нефелин. Получаемый в процессе обогащения руды апатитовый концентрат — ценное сырье для производства фосфорных удобрений. Области применения нефелина были неясны.

Опыт работы в химической лаборатории Кожевенного треста навел Н. В. Белова на мысль об использовании нефелина в процессе дубления кожи. Эта идея была доведена до практической реализации. Была показана также возможность использования нефелина в текстильной, бумажной и деревообрабатывающей отраслях промышленности. На эти процессы Н. В. Беловым были получены четыре авторских свидетельства. Работа была высоко оценена В. И. Вернадским и А. Е. Ферсманом.

Исследования другого минерала, апатита, позволили Н. В. Белову разработать способ извлечения из него примесей редкоземельных элементов. При этом принималась во внимание кристаллическая структура апатита и локализация в нем интересующих примесей.

В 1932 году А. Е. Ферсман и другой редактор, Л. С. Берг, были вынуждены прекратить работу в журнале «Природа», перестал в нем публиковать свои статьи и Н. В. Белов. Однако самые дружественные отношения его с А. Е. Ферсманом продолжались. Н. В. Белов считал А. Е. Ферсмана своим «дорогим другом и наставником» [1].

В 1933 году по предложению А. Е. Ферсмана Н. В. Белов начинает работать старшим специалистом отдела геохимии Ломоносовского института геохимии, минералогии и кристаллографии, не оставляя при этом работы в химической лаборатории Кожевенного треста.

В 1934 году Н. В. Белов по предложению А. Е. Ферсмана начинает большую работу по переводу на русский язык книги норвежского профессора О. Гасселя «Кристаллохимия». В сво-

их воспоминаниях об А. Е. Ферсмане Н. В. Белов писал: «Геохимия второй четверти нашего столетия создавалась совместно А. Е. Ферсманом и В. М. Гольдшмидтом. Восемь томов «Геохимических исследований» Гольдшмидта содержали огромное количество новых кристаллохимических данных, которые были часто полностью непонятны геологам и минералогам» [1]. Напомним, что В. М. Гольдшмидт (1888–1947), норвежский геохимик, один из основоположников геохимии, в 1928–1935 годах работал в Германии, в Геттингенском университете, после прихода фашистов к власти вернулся в Норвегию. Книга О. Гасселя, содержащая систематическое изложение основ кристаллохимии, в 1934 году вышла на немецком языке и сразу же была переведена на английский.

Работая над переводом этой книги, Н. В. Белов значительно увеличил ее объем, основываясь на данных журнальной литературы, создал ценнейшее руководство для отечественных кристаллохимиков [4]. К переводу была приложена статья профессора А. В. Шубникова (1887–1970, академик с 1953 г.), руководителя кристаллографического сектора Ломоносовского института [5].

В 1934 году ряд научных учреждений и руководство Академии наук переезжают из Ленинграда в Москву. Н. В. Белов воспринимает этот переезд без всякого энтузиазма и перебирается в столицу только в конце 1935 года (или в начале 1936-го). Вскоре после переезда он переходит в Ломоносовском институте из сектора геохимии, где он раньше работал, в сектор кристаллографии, возглавляемый А. В. Шубниковым, решив полностью сосредоточиться на исследованиях в области кристаллографии и кристаллохимии. Ему было 44 года.

В 1936 году Н. В. Белову присуждается учennaя степень кандидата геолого-минералогических наук без защиты диссертации. В 1937–1944 годах он занимает должность сначала старшего специалиста, затем — старшего научного сотрудника сектора (лаборатории) кристаллографии. Основная цель работы Н. В. Белова в этот период — создание единой кристаллографической картины неорганических структур, прежде всего, развитие учения об атомном строении природных минералов, главным образом силикатов.

В 1934–1941 годах при непосредственном участии Н. В. Белова создаются два кристалло-

химических музея: сначала в Ленинградском горном институте, а затем — в Лаборатории кристаллографии АН СССР. Мировое признание Н.В. Белову принесли работы по теории плотнейших шаровых упаковок и применению их к описанию строения неорганических кристаллических веществ. В плотнейшей упаковке шаров одинакового радиуса имеются пустоты двух сортов: меньшие по объему тетраэдрические, образованные четверками основных шаров, и октаэдрические, ограниченные шестью шарами. Атомную структуру многих неорганических соединений можно описать соответствующим плотнейшими упаковками крупных атомов с заселением части пустот атомами меньших размеров. С позиций плотнейших упаковок атомов, дополненных схемами заселения в них пустот, Н.В. Белов рассмотрел и систематизировал огромное число структур минералов и других неорганических соединений.

В годы войны Лаборатория кристаллографии, уже выделенная в самостоятельное научное подразделение АН СССР (с 1943 года — Институт кристаллографии АН СССР) была эвакуирована из Москвы в Свердловскую область, но Н.В. Белов остался в столице. В 1943 году он защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора химических наук на тему «Плотнейшие шаровые упаковки». Диссертация послужила основой монографии «Структура ионных кристаллов и металлических фаз» [6]. Идеи, заложенные в этой книге, многие годы используются при изучении атомной структуры кристаллов. В 1946 году Н.В. Белов был избран членом-корреспондентом АН СССР по Отделению геологии и геохимии.

В 1946 году А.В. Шубников и Н.В. Белов начали подготовку специалистов в области кристаллографии на физико-математическом факультете Горьковского государственного университета, где ряд лет Н.В. Белов руководил кафедрой кристаллографии и получил звание профессора. Одновременно он продолжал интенсивную работу в Институте кристаллографии АН СССР. В 1951 году Н.В. Белов опубликовал монографию «Структурная кристаллография», в которой были изложены основные положения его учения о кристаллических решетках. За достижения в изучении атомной структуры кристаллов Н.В. Белову в 1952 году была присуждена Сталинская государственная премия первой сте-

пени. В 1953 году он был избран действительным членом АН СССР.

В том же году Н.В. Белов стал профессором кафедры кристаллохимии и кристаллографии геологического факультета МГУ, а в 1961 году возглавил эту кафедру. При этом ученый не прекратил своего шефства на общественных начальниках над кафедрой кристаллографии в г. Горьком.

В 1961 году Н.В. Белов суммировал свои многолетние исследования в области силикатов в монографии «Кристаллохимия силикатов с крупными катионами» [6]. Прогресс вычислительной техники, растущие возможности дифракционного эксперимента весьма положительно сказались на количественном и качественном изучении структур соединений. От изучения силикатов Н.В. Белов с сотрудниками перешел к исследованию структур германатов, сульфатов, иодатов, фосфатов, баратов.

Начиная с 1949 года Н.В. Белов начал систематически публиковать в «Минералогических сборниках Львовского геологического общества» свои «Очерки по структурной минералогии», в которых в доступной форме излагал то новое, что вносили в геологию достижения кристаллохимии. В 1976 году 126 очерков вышли в виде отдельной книги. Всего ученый опубликовал 250 очерков.

Много времени и сил Н.В. Белов отдавал научно-организационной деятельности. С 1955 года и до конца жизни он был бессменным председателем Национального комитета советских кристаллографов, главным редактором журнала «Кристаллография» (с 1968 года), членом редколлегии «Журнала структурной химии» (1962–1977 гг.). Был членом бюро Отделения физико-химии и технологии неорганических материалов АН СССР.

Велик международный авторитет Н.В. Белова. Много лет он был членом Исполнительного комитета Международного союза кристаллографов и его вице-президентом, в 1966–1969 гг. — президентом. Был почетным членом Минералогических обществ СССР, США, Англии, Франции, ГДР, иностранным почетным членом Польской Академии наук, почетным доктором Вроцлавского университета. Н.В. Белов принимал участие во многих международных совещаниях и конференциях, возглавлял советскую делегацию на кристаллографических конгрессах.

Научная, педагогическая и общественная деятельность Н.В. Белова получила высокую



оценку. Ему было присвоено звание Героя Социалистического труда (1969), он был награжден четырьмя орденами Ленина, орденами Октябрьской Революции, Трудового Красного Знамени. В 1965 году Академия наук присудила Н.В. Белову свою высшую награду — Золотую медаль имени Ломоносова.

Н.В. Белов обладал энциклопедическими знаниями и литературным талантом. Вся его долгая жизнь была заполнена непрерывным трудом. Даже в возрасте 90 лет он обладал исключительной работоспособностью.

Николай Васильевич Белов скончался 6 марта 1982 года на девяносто первом году жизни.

11 марта 1982 года на гражданской панихиде академик Б.С. Соколов сказал: «...Это был человек уникальный, уникальный во всех отношениях, я бы сказал, уникальный не только как учёный, как гордость и национальная слава нашей науки, он был уникален просто как человек» [9].

Ему посвящено огромное количество публикаций. Относительно подробный анализ его научной, педагогической и общественной деятельности содержится в работах [6–10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белов, Н.В.** [Текст] // Проблемы минерального сырья. Памяти академика А.Е. Ферсмана.— М.: Наука, 1975.— С. 237–241.
2. **Морачевский, А.Г.** Очерки о химиках и химии [Текст] / А.Г. Морачевский.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— 147 с.
3. **Морачевский, А.Г.** Очерки о химиках России [Текст] / А.Г. Морачевский.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.— 155 с.
4. **Гассель, О.** Кристаллохимия [Текст] / О. Гассель / Перев. под ред. и с прилож. статьи проф. А.В. Шубникова.— Л.: ОНТИ, Химтеорет, 1936.— 200 с.
5. Алексей Васильевич Шубников (1887–1970) [Текст] // Л.: Наука, 1984.— 222 с.
6. Николай Васильевич Белов (1891–1982) [Текст] // Материалы к библиографии ученых СССР. Серия геологич. наук.— Вып. 35.— М.: Наука, 1987.
7. Николай Васильевич Белов. К девяностолетию со дня рождения [Текст] // Кристаллография.— 1981.— Т. 26, № 6.— С. 1141–1146.
8. К 90-летию Николая Васильевича Белова [Текст] // Вестник Моск. Ун-та. Серия 4: Геология.— 1981. № 5.— С. 3–9.
9. Кристаллография и кристаллохимия: Посвящается памяти академика Н.В. Белова [Текст].— М.: Наука, 1986.— С. 3–8.
10. Структурная кристаллография: К столетию со дня рождения академика Н.В. Белова [Текст].— М.: Наука, 1992.— С. 3–9.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ

АМОСОВ Николай Тимофеевич — кандидат технических наук профессор кафедры промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 297-48-28

nt_amossov@mail.ru

АНАСТАСИАДИ Григорий Панеодович — доктор технических наук заведующий кафедрой технологии металлов и металловедения Санкт-Петербургского института машиностроения

195197, Санкт-Петербург, Полюстровский пр., д. 14

(812) 540-01-59

АНДРИАНОВА Мария Юрьевна — кандидат технических наук доцент кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 297-59-28

АНИСИМОВА Екатерина Борисовна — инженер ОАО «Атомэнергопроект».

193036, г. Санкт-Петербург, Суворовский пр., д.2

(812)-717-01-34

e_anisimova@sol.spbaep.ru

АРУСТАМЯН Арам Иванович — аспирант кафедры управления конструкторско-технологическими инновациями Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

192516, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 534-07-64

arustam@inbox.ru

БАРДА Иева — научный сотрудник Латвийского университета

LV 1586, Latvia, Riga, 19 Raina Blvd, University of Latvia

(6703) 67034444

БАРЫШНИКОВ Сергей Олегович — кандидат технических наук профессор, ректор Санкт-Петербургского государственного университета водных коммуникаций.

198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 7

(812) 251-12-21

rector@spbuwc.ru

БАТУХТИН Андрей Геннадьевич — кандидат технических наук доцент, директор Технопарка Забайкальского государственного университета

672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30, ЗабГУ

(30253)62-2-45

БОГДАНОВ Юрий Владимирович — кандидат технических наук доцент кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812)-297-59-94

БОГОВ Игорь Александрович — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой турбиностроения и средств автоматики, декан турбиностроительного факультета Санкт-Петербургского института машиностроения, Заслуженный работник высшей школы.

195197 г.Санкт-Петербург, пр.Полюстровский, д.14

(812)540-30-48

ВАСИЛЕНКО Геннадий Васильевич — доктор технических наук профессор кафедры промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 297-48-28



ВАСИЛЬЕВ Юрий Сергеевич — доктор технических наук профессор, президент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, действительный член РАН, Заслуженный деятель науки и техники РФ.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-62-40

ВАСИПОВ Владимир Вячеславович — студент, лаборант-исследователь научно-образовательного центра современных технологий в сфере общественного питания и экспертизы потребительских товаров Санкт-Петербургского торгово-экономического института.

194021 Санкт-Петербург, ул. Новороссийская д. 50, СПбТЭИ

(812) 306-19-15

ekspertiza.tei@gmail.com

ВОЛОВЕЙ Александр Георгиевич — аспирант, лаборант-исследователь научно-образовательного центра современных технологий в сфере общественного питания и экспертизы потребительских товаров Санкт-Петербургского торгово-экономического института.

194021 Санкт-Петербург, ул. Новороссийская д. 50, СПбТЭИ

(812) 297-78-06

volovey@mail.ru

ГЕРМАН Елена Александровна — аспирант кафедры теоретических основ инновации Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 559-69-55

elena250573@rambler.ru

ГОЛИКОВ Владимир Анатольевич — кандидат технических наук доцент кафедры гидромашиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 297-84-30

hydrom@pef.spbstu.ru

ГОЛОД Валерий Михайлович — кандидат технических наук профессор кафедры физико-химии литьевых сплавов и процессов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-72-43

cheshire@front.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) 248-91-93

kaf-uzchs@mail.ru

ДЕГТЬЯРЕВА Раиса Васильевна — доктор исторических наук профессор кафедры истории гуманитарного факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-98-42

ДМИТРИЕВ Александр Георгиевич — доктор физико-математических наук профессор кафедры теоретических основ инновации Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-88-49

dmitriev.ag@mail.ru

ДОБРЕЦОВ Роман Юрьевич — кандидат технических наук доцент кафедры колесных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 534-14-10

dr-idpo@yandex.ru

ДОБРОБОРСКИЙ Борис Самуилович — кандидат технических наук доцент кафедры транспортно-технологических машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета

190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красногвардейская, д. 4, СПбГАСУ

(812) 575-01-95

ДУДНИК Татьяна Анатольевна — аспирант кафедры турбиностроения и средств автоматики Санкт-Петербургского института машиностроения

195197 г. Санкт-Петербург, пр. Полюстровский, д. 14

(812) 540-30-48

T_Dudnik@nwenco.ru

ЕПИФАНОВ Андрей Андреевич — аспирант кафедры теоретических основ теплотехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ

(812) 552-77-73

a.a.epifanov@gmail.com

ЖАРКОВСКИЙ Александр Аркадьевич — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой гидромашиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297-84-30
hydrom@pef.spbstu.ru

ЗАБЕЛИН Николай Алексеевич — кандидат технических наук доцент кафедры турбинных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-65-66
turbo@pef.spbstu.ru

ЗАХАРОВ Александр Викторович — ведущий инженер-конструктор лаборатории водяных турбин ЛМЗ (филиал ОАО «Силовые машины»).

195009, г. Санкт-Петербург, Свердловская наб., 18, ОАО «Силовые машины», ЛМЗ
(812) 326-76-25
zhrv386@rambler.ru

ЗУБОВ Всеволод Иванович — аспирант факультета прикладной математики — процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета

199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. д. 7-9, СПбГУ
8(812)274-80-11
zubovnv@mail.ru

ЗУБОВ Сергей Владимирович — кандидат физико-математических наук доцент факультета прикладной математики — процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета

199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. д. 7-9, СПбГУ
8(812)274-80-11
zubovnv@mail.ru

ИГОЛКИН Борис Иванович — кандидат технических наук доцент старший научный сотрудник научно-образовательного центра современных технологий в сфере общественного питания и экспертизы потребительских товаров Санкт-Петербургского торгово-экономического института

194021 Санкт-Петербург, ул. Новороссийская д. 50, СПбТЭИ
(812)528-20-91
bigolkin@rambler.ru

КАЛАШНИКОВ Вадим Серафимович — доктор технических наук профессор, начальник сектора ОАО «ВНИИРА»

199106, г. Санкт-Петербург, Шкиперский проток, д. 19
(812) 356-06-11

КЕСАМАНЛЫ Фагам Паша-оглы — доктор физико-математических наук профессор кафедры экспериментальной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, С-Петербург, Политехническая ул., д. 29, СПбГПУ
(812)552-75-31

КИРИЛЛОВ Александр Иванович — доктор технических наук профессор кафедры теоретических основ теплотехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812)552-77-73
tot@pef.spbstu.ru

КИРИЛЛОВ Михаил Викторович — ведущий инженер по наладке и испытаниям производственно-технического отдела филиала ОАО «ОГК-3» «Ханзорская ГРЭС»

672520, Забайкальский край, Оловянинский р-н, п. Ясногорск
(30253) 62-2-45
KirillovMV@ogk3.ru

КИРПАНЕВ Алексей Владимирович — доктор технических наук старший научный сотрудник, начальник сектора ОАО «ВНИИРА»

199106, г. Санкт-Петербург, Шкиперский проток, д. 19
(812) 356-06-11
kirpanevav@mail.ru

КОЖЕВНИКОВ Николай Михайлович — доктор физико-математических наук профессор кафедры экспериментальной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, ученый секретарь Научно-методического совета по физике Министерства образования и науки РФ, Заслуженный работник высшей школы РФ.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-77-90

КОЗЕЛЕЦКАЯ Татьяна Александровна — кандидат экономических наук доцент кафедры международного менеджмента Международной высшей школы управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 329-47-96 (4518)
marta9578@mail.ru



КОНДРАТЬЕВ Сергей Юрьевич — доктор технических наук профессор кафедры исследований структуры и свойств материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ;
(812) 552-89-69
z1dehy97@mail.wplus.net

КОНОВАЛОВ Юрий Васильевич — кандидат технических наук доцент кафедры электропривода и электрического транспорта Иркутского государственного технического университета.

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83, НИ ИрГТУ
(3952) 41-25-41
yrvaskon@mail.ru

КОРОВКИН Николай Владимирович — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-75-72
nikolay.korovkin@gmail.com

КОРОТКОВ Александр Владимирович — аспирант кафедры электротехники и электротехнологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-76-43
kav009@yandex.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

КУРАКИН Антон Сергеевич — старший научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского центра экологической безопасности РАН

197110, Санкт-Петербург, ул. Корпусная, д. 18, (НИЦЭБ РАН)
(812) 230-79-75

ЛАСКИН Александр Степанович — доктор технических наук профессор кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-65-66

ЛОГИНОВ Сергей Юрьевич — аспирант кафедры электропривода и систем автоматизации Псковского государственного университета

180000, г. Псков, ул. Ленина, д.8, Псковский государственный университет
(812) 72-40-37
lsy1@mail.ru

ЛОПОТА Виталий Александрович — доктор технических наук заведующий кафедрой сварки и лазерных технологий, член-корреспондент РАН, президент РКК «Энергия» имени С.П. Королёва

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-98-43

МАСЛОВ Владимир Иванович — доктор технических наук профессор кафедры управления конструкторско-технологическими инновациями Санкт-Петербургского государственного политехнического университета,

192516, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 534-07-64
vimaslov@tu.neva.ru

МАТВЕЕВ Юрий Владимирович — аспирант кафедры турбинных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-65-66
turbo@pef.spbstu.ru

МЕХТИЕВ Вадим Сейдуллаевич — кандидат технических наук старший научный сотрудник научно-образовательного центра современных технологий в сфере общественного питания и экспертизы потребительских товаров Санкт-Петербургского торгово-экономического института,

194021 Санкт-Петербург, ул. Новороссийская д. 50, СПбТЭИ
(812) 528-20-91
vadim.dag@mail.ru

МИТРОФАНОВ Юрий Александрович — аспирант кафедры цветных металлов Санкт-Петербургского государственного Политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 592-95-54
yurasell@yandex.ru

МИТЮГИН Александр Андреевич — аспирант кафедры электроэнергетики и техники высоких технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 555-42-86
Aleksandr.mityugin@ya.ru

МОЛОДКИНА Людмила Михайловна — доктор физико-математических наук профессор кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297-59-28
asminaster@gmail.com

МОРАЧЕВСКИЙ Андрей Георгиевич — доктор технических наук профессор кафедры физической химии, микро- и нанотехнологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, Заслуженный деятель науки и техники РФ.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812)552-63-87

НАУМОВ Иван Васильевич — кандидат технических наук заведующий лабораторией при кафедре гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812)297-59-28

ОРЛОВА Ирина Геннадьевна — аспирант кафедры физико-химии литьевых сплавов и процессов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812)552-72-43

ОРЫЩЕНКО Алексей Сергеевич — доктор технических наук заведующий кафедрой функциональных материалов и технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, генеральный директор ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»

191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, д. 49
(812) 335-58-52

ОХАПКИН Кирилл Алексеевич — аспирант кафедры сварки и лазерных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
kirill.okhapolkin@mail.ru

ПЕТРОВ Никита Вячеславович — стажер-исследователь сектора численного моделирования Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе РАН

194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
(812) 444-27-56
nikita.ppk@gmail.com

ПЕТРОВ Сергей Николаевич — кандидат химических наук доцент кафедры функциональных материалов и технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, начальник сектора электронной микроскопии ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей».

191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, д. 49;
(812) 335-58-45

ПЛОТНИКОВ Игорь Геннадьевич — аспирант кафедры электротехники и электромеханики Санкт-Петербургского государственного горного университета.

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2
(812) 328-82-70
plotnikov_igor86@mail.ru

ПОПОВ Владимир Юрьевич — аспирант кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 248-91-93

ПОПОВ Игорь Олегович — доктор технических наук профессор кафедры цветных металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 294-42-68,
Prof.popov@yandex.ru.

ПУРВИЯ Санта — Ph. D. Латвийский институт гидроэкологии

LV-1048, Rīga, Daugavgrīvas str. 8, Latvian Institute of Aquatic Ecology
(6703) 67601995. Fax: 67601995
hydro@latnet.lv

РАДКЕВИЧ Михаил Михайлович — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой технологии конструкционных материалов и материаловедения, декан механико-машиностроительного факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812)552-66-23
radmich@mail.ru

РАССОХИН Виктор Александрович — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-65-66.



РЕБАНЕ Константин Юрьевич — студент, лаборант-исследователь научно-образовательного центра современных технологий в сфере общественного питания и экспертизы потребительских товаров Санкт-Петербургского торгово-экономического института.

194021 Санкт-Петербург, ул. Новороссийская д. 50, СПбТЭИ
(812) 528-20-91

РИМША Элина — научный сотрудник Латвийского университета

LV 1586, Latvia, Riga, 19 Raina Blvd, University of Latvia
(6703) 67034444

РУМАХЕРАНГ Вулфилла Максимилиан — аспирант кафедры гидромашиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297-84-30.
mawieng@yahoo.com

РУСИНОВ Ростислав Викторович — доктор технических наук профессор кафедры колесных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 534-14-10

САФРОНОВ Павел Григорьевич — аспирант кафедры тепловых электрических станций Забайкальского государственного университета

672039, г. Чита, ул. Баргузинская, д. 49, ЗабГУ
(3022) 41-70-85

СТРЕКОПЫТОВ Сергей Александрович — кандидат физико-математических наук доцент факультета прикладной математики — процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета

199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. д. 7-9, СПбГУ
zubovnv@mail.ru

СТРЕКОПЫТОВА Мария Владимировна — кандидат физико-математических наук доцент факультета прикладной математики — процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета

199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. д. 7-9, СПбГУ
zubovnv@mail.ru

СМОЛОВИК Сергей Владимирович — доктор технических наук профессор, заместитель заведующего отделом проектирования и развития энергосистем (ОПРЭ) ОАО «НИИПТ»,

194223, г. С-Петербург, ул. Курчатова, 1, Лит А
smolovik@niipt.ru

СУХОТЕРИН Михаил Васильевич — доктор технических наук профессор кафедры математики Санкт-Петербургского государственного университета водных коммуникаций.

198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5/7
(812) 334-38-14

СЫСОЕВ Алексей Васильевич — аспирант кафедры электрических систем и сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-50-72
sysoev-alexey@mail.ru

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
egps@cef.spbstu.ru

ТОПАЖ Григорий Ицкович — доктор технических наук профессор кафедры гидромашиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297-84-30, (812) 699-40-11
topaj@mail.ru

ТУМАНОВ Александр Юрьевич — доцент кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 248-91-93
toumanov@mail.ru

УСМАНОВА Регина Равилевна — кандидат технических наук доцент, старший научный сотрудник Государственного автономного научного учреждения «Институт прикладных исследований» Академии наук Республики Башкирия.

453103, Башкортостан, г. Стерлитамак, ул. Одесская, 68, ИПИ АН РБ.
(3473) 20-59-70
Usmanovarr@mail.ru

УСТИНОВ Денис Анатольевич — кандидат технических наук доцент кафедры электротехники и электромеханики Санкт-Петербургского государственного горного университета.

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2
(812) 328-82-70
bescheiden@rambler.ru

УШАКОВ Андрей Павлович — доктор технических наук старший научный сотрудник, заведующий кафедрой диагностики и неразрушающего контроля технических систем Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации

196210 г. Санкт-Петербург, ул. Пилотов, д. 38, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации

(812)704-18-70
Ushakovap@mail.ru

ФЕДОСОВСКИЙ Михаил Евгеньевич — кандидат технических наук генеральный директор ЗАО «ДИАКОНТ»

195274, Санкт-Петербург, Учительская, дом 2
(812) 334-00-81

ФОМИН Дмитрий Юрьевич — аспирант кафедры технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-93-02

ФРОЛОВ Владимир Яковлевич — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой электротехники и электротехнологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-76-43
frolov.eed@gmail.com

ФУКС Михаил Дмитриевич — аспирант ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», инженер-технолог 2-й категории ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей».

191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, д. 49
(812) 274-16-19

ХАРИСОВ Ирек Саитгалиевич — аспирант кафедры турбинных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, заместитель генерального директора по производству ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург».

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-65-66

ХВОСТОВА Марина Сергеевна — кандидат географических наук доцент кафедры океанотехники и энергетических установок филиала (Севмашвтуз) Санкт-Петербургского государственного морского технического университета

164500, Россия, Архангельская обл., г. Северодвинск, ул. Капитана Воронина, д.6.
marinakhvostova@list.ru

ХОЛОДКЕВИЧ Сергей Викторович — доктор технических наук профессор, заведующий лабораторией биоэлектронных методов геоэкологического мониторинга Санкт-Петербургского научно-исследовательского центра экологической безопасности РАН

197110, Санкт-Петербург, ул. Корпусная, д. 18, НИЦЭБ РАН
(812) 230-77-43

ЦЫГАНКОВА Юлия Сергеевна — аспирант кафедры автоматизации технологических процессов Энергетического института Томского научно-исследовательского политехнического университета.

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет
(3822) 434-275
tsygankovays@nipineft.tomsk.ru

ЧУСОВ Александр Николаевич — кандидат технических наук доцент, исполняющий обязанности заведующего кафедрой гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 297-59-28

ШЕЛОМОВ Владимир Борисович — доктор технических наук заведующий кафедрой колесных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 534-14-10
dr-idpo@yandex.ru

ЮРЕВИЧ Евгений Иванович — доктор технических наук, профессор кафедры мехатроники и роботостроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, Заслуженный деятель науки и техники, Почетный главный конструктор ЦНИИ РТК.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-45-44
kafedra@rtc.ru

ЯКОВЛЕВ Валерий Иванович — доктор технических наук профессор кафедры электроэнергетики и техники высоких напряжений Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812)555-42-86

ЯСТРЕБОВ Филипп Викторович — аспирант кафедры автоматов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ
(812) 552-65-68
megarius@mail.ru

АННОТАЦИИ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Фролов В. Я., Коротков А. В. О ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМАТИВНЫХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И СТРУКТУРЫ ФАКТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ.

Предложены реальные способы повышения точности определения наиболее значимых составляющих отчетных потерь электроэнергии. Расчетным и опытным путем проведено уточнение коэффициентов, используемых при определении условно-постоянных потерь в трансформаторах, нагрузочных и коммерческих потерь электроэнергии.

ГОРОДСКИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ. ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ. ПОТЕРИ ХОЛОСТОГО ХОДА ТРАНСФОРМАТОРОВ. НАГРУЗОЧНЫЕ ПОТЕРИ. КОММЕРЧЕСКИЕ ПОТЕРИ.

Сысоев А. В., Смоловик С. В. РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ РАЗВИТИЯ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ МЕЖСИСТЕМНОЙ СВЯЗИ.

В статье проводится анализ слабого сечения энергосистемы, состоящего из двух параллельных линий (500 и 220 кВ). Моделируется развитие аварии при отключении одной из параллельных линий и рассматриваются несколько вариантов мероприятий по предотвращению нарушения работы энергосистемы.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. АВАРИЙНЫЙ РЕЖИМ. КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ. АКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ.

Епифанов А. А., Кириллов А. И., Рассохин В. А. ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОПАТОЧНЫХ РЕШЕТОК МАЛОРАСХОДНЫХ ТУРБИН.

Оценена возможность применения программного комплекса вычислительной гидродинамики ANSYS CFX к расчету трехмерного течения в лопаточных решетках малорасходных турбин ЛПИ. Сформулированы рекомендации по выбору комплекта вычислительных опций, обеспечивающих приемлемую точность результатов моделирования. Расчеты решеток ЛПИ верифицированы по данным стендовых испытаний.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ГИДРОДИНАМИКА. ANSYS CFX. ЛОПАТОЧНЫЕ РЕШЕТКИ. МАЛОРАСХОДНЫЕ ТУРБИНЫ ЛПИ.

Василенко Г. В., Амосов Н. Т. ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ СЕТЕВЫХ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГОБЛОКА Т-180-130 И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СНИЖЕНИЮ ИХ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ.

В статье представлены результаты диагностики состояния сетевых подогревателей энергоблока Т-180-130 и анализируется характер повреждений трубчатой системы горизонтальных подогревателей ПСГ-5000. Материал трубчатой системы — аустенитная нержавеющая сталь 12Х18Н10Т. Доказано, что образование поперечных трещин на трубках в области трубных досок обусловлено тепловыми ударами при включении аппаратов в работу. Предлагаются рекомендации по предупреждению этого явления.

СЕТЕВЫЕ ПОДОГРЕВАТЕЛИ. ТРУБКИ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ. ПОПЕРЕЧНЫЕ ТРЕЩИНЫ. ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ.

Коровкин Н. В., Калашников В. С., Кирпанев А. В. ЦИЛИНДРИЧЕСКОЕ СКАНИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ.

В статье представлены методы определения внешних электромагнитных полей электро- и радиотехнических устройств на основе цилиндрического зондирования некоторых составляющих электрического и/или магнитного полей. Исследуемые устройства рассматриваются как источники помехоэмиссии. Получены выражения идентификации электромагнитных полей для сверхширокополосного и квазистационарного случаев.

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ. БЛИЖНЕЕ И ДАЛЬНЕЕ ПОЛЯ. ВОЛНОВОЕ И КВАЗИСТАЦИОНАРНОЕ ПОЛЯ. ИСТОЧНИКИ ПОМЕХ. ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ СКАНЕР.

Епифанов А. А., Кириллов А. И., Рассохин В. А. РАСЧЕТ ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ В СТУПЕНЯХ МАЛОРАСХОДНЫХ ТУРБИН.

Рассмотрены вопросы моделирования трехмерного течения в малорасходных ступенях ЛПИ. Исследовано влияние реализованных в программном комплексе ANSYS CFX способов сопряжения течения в сопловой и рабочей решетках на характеристики малорасходной ступени. Расчеты ступени ЛПИ верифицированы по экспериментальным данным.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ГИДРОДИНАМИКА. ANSYS CFX. МАЛОРАСХОДНЫЕ ТУРБИННЫЕ СТУПЕНИ ЛПИ.

Логинов С. Ю. СНИЖЕНИЕ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ РАДИАЛЬНЫХ СИЛ В БЕСПОДШИПНИКОВОЙ ИНДУКТОРНОЙ МАШИНЕ.

Обозначены преимущества бесподшипниковых машин. Построена аналитическая модель бесподшипниковой индукторной машины. Разработан алгоритм задания токов управления подвесом для снижения взаимного влияния радиальных сил.

БЕСПОДШИПНИКОВАЯ ИНДУКТОРНАЯ МАШИНА. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. РАДИАЛЬНЫЕ СИЛЫ. ТОКИ УПРАВЛЕНИЯ.

Цыганкова Ю. С. ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ ПОТЕРЬ ТЕПЛА В ТЕПЛОВЫХ СЕТЯХ.

Предложен декомпозиционный подход к расчету потерь тепла по длине трубопроводов с учетом реального состояния изоляции и условий эксплуатации тепловых сетей. Проведено сопоставление расчетных потерь тепла с проектными и нормативными потерями. Показан потенциал теплосбережения в системе транспорта тепловой энергии, не отраженный в действующей методике расчета потерь тепла.

ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЙ ПОДХОД. ТЕПЛОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ. ТРНСПОРТНЫЕ ПОТЕРИ ТЕПЛА. НЕШТАТНЫЕ УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ. НЕОДНОРОДНОСТЬ ИЗОЛЯЦИИ ПО ДЛИНЕ ТРУБОПРОВОДА. ЭФФЕКТИВНАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ.

Устинов Д. А., Коновалов Ю. В., Плотников И. Г. ПАСПОРТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ.

В статье рассмотрены вопросы рационализации электропотребления нефтегазодобывающих предприятий путем паспортизации электрических нагрузок. Построены профили графиков нагрузок отдельных подстанций и определены профили усредненных графиков нагрузки нефтегазодобывающих предприятий в целом (суммированием профилей графиков отдельных подстанций). Вычислены по полученным графикам коэффициенты формы, заполнения, равномерности. Определены максимальные, минимальные и средние нагрузки по тарифным зонам.

ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ. ПАСПОРТИЗАЦИЯ. ГРАФИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК. ОБОБЩЕННАЯ СХЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ. КОЭФФИЦИЕНТЫ ФОРМЫ, ЗАПОЛНЕНИЯ, РАВНОМЕРНОСТИ.

Тананаев А. В. ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В БЛАНКЕТЕ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА.

Рассмотрены вопросы использования жидких металлов в бланкете и контактных устройствах термоядерных реакторов. Для основных схем компоновки бланкета проанализированы способы уменьшения перепадов давления при течении жидкокометаллического теплоносителя в магнитном поле реактора. Отмечены особенности течения проводящих сред в сильных магнитных полях; на основе экспериментальных данных определены условия перехода к линейному режиму течения в характерных элементах проточного тракта бланкета; рассмотрены способы интенсификации теплообмена в бланкете, позволяющие снизить термомеханические напряжения и уменьшить расход жидкого металла за счет выравнивания профиля температур и роста коэффициента теплоотдачи.

ЖИДКИЙ МЕТАЛЛ. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООТДАЧИ. БЛАНКЕТ. ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ.

Петров Н. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ВОДЕ ВБЛИЗИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.

Предложен алгоритм численного моделирования подводного взрыва при наличии межфазной границы. Проведено исследование процессов, сопровождающих подводный взрыв вблизи свободной поверхности.

ПОДВОДНЫЙ ВЗРЫВ. ЗАДАЧА РИМАНА. МЕЖФАЗНАЯ ГРАНИЦА. ВОЛНЫ СЖАТИЯ И РАЗРЕЖЕНИЯ.



Батухтин А. Г., Сафонов П. Г., Кириллов М. В. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА ХОЛОДНОГО ВОЗДУХА ПЕРЕД ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯМИ КОТЛОВ (НА ПРИМЕРЕ ХАРАНОРСКОЙ ГРЭС).

В статье рассмотрены оптимизация предварительного подогрева воздуха, включающая различные технические решения, и выбор наиболее оптимальных вариантов с учетом наименьших капиталовложений. Предложенное схемное решение позволяет существенно увеличить эффективность и рентабельность производства электроэнергии. Рассмотрена возможность работы котлов Харанорской ГРЭС без калориферов, а также использование пара для предварительного подогрева холодного воздуха с более низкими параметрами.

ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЬ. УХОДЯЩИЕ ГАЗЫ. КАЛОРИФЕР. РАСХОД ТЕПЛОТЫ. УГОЛЬ. ТЭС. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ.

Митюгин А. А., Яковлев В. И. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ.

Рассмотрена экспериментальная установка для генерирования электромагнитных помех, которые возникают в сети при отключении тока короткого замыкания. Выполнено исследование их влияния на вторичное напряжение импульсного блока питания.

ЭКСПЕРИМЕНТ. ИССЛЕДОВАНИЕ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХИ. ОТКЛЮЧЕНИЕ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ. ИМПУЛЬСНЫЙ БЛОК ПИТАНИЯ.

Анисимова Е. Б., Богданов Ю. В. ПЕРСПЕКТИВНОЕ ИННОВАЦИОННОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗООХЛАЖДАЕМЫХ РЕАКТОРОВ В ПЛАВУЧИХ АТЭС.

В статье рассматриваются возможности применения в плавучей атомной электростанции (ПАТЭС) перспективных высокотемпературных реакторов (ВТГР). Приводятся основные преимущества этого типа реакторов по сравнению с другими. Отмечается надежность и безопасность ПАТЭС с ВТГР в условиях их эксплуатации в труднодоступных районах.

ПЛАВУЧАЯ АТОМНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ГАЗООХЛАЖДАЕМЫЙ РЕАКТОР. ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНОЙ СТАНЦИИ. НАДЕЖНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ.

Румахеранг В. М., Топаж Г. И., Захаров А. В. МЕТОДИКА РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГИДРОТУРБИН.

Предложена методика расчета кавитационных показателей гидротурбины. Выполнены расчетные исследования кавитационных показателей гидротурбины типа РО230 и дано сопоставление результатов расчета с экспериментом.

ГИДРОТУРБИНА. КАВИТАЦИЯ. КПД. ХАРАКТЕРИСТИКА. ПРОГРАММА. РАСЧЕТ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ДАВЛЕНИЕ.

Рассохин В. А., Забелин Н. А., Матвеев Ю. В., Харисов И. С. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СТУПЕНЕЙ ТУРБОУСТАНОВОК МАЛОЙ МОЩНОСТИ НА СТЕНДАХ СПбГПУ.

Рассмотрена методика проведения эксперимента, рассмотрено используемое оборудование и обработка данных.

МИКРОТУРБИНА. ГАЗОТУРБИННАЯ УСТАНОВКА. РАЗВИТИЕ. ЭНЕРГЕТИКА. ЭКСПЕРИМЕНТ.

Шеломов В. Б., Добрецов Р. Ю. УТОЧНЕНИЕ МОДЕЛИ ПОВОРОТА ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ.

Предложена математическая модель поворота, учитывающая скольжение на опорной поверхности, использующая базовые положения теории гусеничных машин и позволяющая охватить явление частичного заноса. Последовательность расчетов и характерные особенности результатов проиллюстрированы на примере.

ПОВОРОТ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН. ТЕОРИЯ ДВИЖЕНИЯ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН. БОКОВОЕ СКОЛЬЖЕНИЕ.

Дудник Т. А., Богоев И. А. О НОРМИРОВАНИИ РАСЧЕТОВ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ХРУПКУЮ ПРОЧНОСТЬ.

Проведено сравнение известных решений определения коэффициентов интенсивности напряжений резьбовых соединений. Разработаны предложения для расчета резьбовых соединений на хрупкую прочность.

РАСЧЕТ. КОЭФФИЦИЕНТ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ. ТРЕЩИНА. ПРОЧНОСТЬ.

Маслов В. И., Арутамян А. И. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРИОЗВОДСТВА ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ.

В статье рассмотрена проблема повышения качества поршневых колец. Предложена технология автоматизированного контроля положения ковша с расплавленным металлом при изготовлении отливок, обеспечивающая снижение отклонений характеристик поршневых колец от требуемых.

УПРАВЛЕНИЕ. КАЧЕСТВО. ПОРШНЕВЫЕ КОЛЬЦА. АВТОМАТИЗАЦИЯ. КОНТРОЛЬ.

Дудник Т. А., Богоев И. А., Ласкин А. С. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМЫХ РАЗМЕРОВ ДЕФЕКТОВ В ЗАГОТОВКАХ КРУПНЫХ РОТОРНЫХ ВАЛОВ.

Представлена классификация, согласно которой дефекты рассматривают как одиночные, взаимодействующие и объединенные. Определены допустимые размеры дефектов вала турбогенератора.

ВАЛ. ДЕФЕКТ. ПРОЧНОСТЬ. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ.

Радкевич М. М., Фомин Д. Ю. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ.

Проведено физическое моделирование процесса полугорячей штамповки стали с использованием опытных образцов оптимальной конфигурации в лабораторных условиях. Установлены режимы деформационно-термической обработки. Выполнен сравнительный анализ структуры и комплекса механических свойств сталей 40Х, 20Х13 и 08Х18Н10Т, обработанных по режимам полугорячей штамповки в заводских и лабораторных условиях. Использование данных режимов в заводских условиях для изготовления поковок из сталей 40Х, 20Х13 и 08Х18Н10Т обеспечит высокий комплекс механических свойств.

ПОЛУГОРЯЧАЯ ШТАМПОВКА. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА. ЛЕГИРОВАННАЯ СТАЛЬ. СТРУКТУРА И КОМПЛЕКС МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВА.

Ушаков А. П. ИНФОРМАТИВНОСТЬ ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОДИАГНОСТИКИ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ.

Рассмотрены преимущества бесконтактной лазерной вибродиагностики состояния машин и конструкций, позволяющие выявлять дефекты, в том числе и на ранних стадиях развития, за счет возможности доступа к любой точке внешней поверхности корпуса машины или конструкции и расширения частотного диапазона виброизмерений. Приведены примеры лазерной диагностики состояния узлов авиационного двигателя в стендовых условиях с использованием спектральных и статистических методов обработки сигналов.

ЛАЗЕРНАЯ ВИБРОДИАГНОСТИКА МАШИН. ГАЗОТУРБИННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ.

Орыщенко А. С., Кондратьев С. Ю., Анастасиади Г. П., Фукс М. Д., Петров С. Н. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ЖАРОПРОЧНОМ СПЛАВЕ 45Х26Н33С2Б2 ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ. СООБЩЕНИЕ 1: ЛИТОЕ СОСТОЯНИЕ.

Исследованы структура, фазовый состав и характер распределения легирующих элементов в структуре жаропрочного сплава 45Х26Н33С2Б2 в литом состоянии. Выявлены ликвация химических элементов в γ-твердом растворе и карбидной эвтектике и образование в сплаве включений, состоящих одновременно из карбидов ниобия и нитридов титана. Обоснована термодинамическая нестабильность литой структуры исследованного сплава.

ЛИТЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ. МИКРОСТРУКТУРА. ФАЗОВЫЙ СОСТАВ. ЛИКВАЦИЯ. СТРУКТУРНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ.

Попов И. О., Митрофанов Ю. А. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭГИРИНОВОГО КОНЦЕНТРАТА – ТЕХНОГЕННОГО ОТХОДА ОАО «АПАТИТ» В КАЧЕСТВЕ КОМПЛЕКСНОГО ФЛЮСА В ПИРОМЕТАЛЛУРГИИ МЕДИ.

В статье рассмотрены проблемы, связанные с применением кварцевого флюса в пирометаллургических процессах производства меди. Описаны основы применения хибинского эгиринового концентрата в качестве флюса в основных плавильных процессах металлургии меди с целью улучшения их основных технико-экономических показателей.

МЕТАЛЛУРГИЯ МЕДИ. КВАРЦЕВЫЙ ФЛЮС. ЭГИРИНОВЫЙ КОНЦЕНТРАТ. ОГНЕВОЕ РАФИНИРОВАНИЕ. КОНВЕРТИРОВАНИЕ. ОБЕДНЕНИЕ ШЛАКОВ.



Охапкин К. А. РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ.

В статье изложена методика расчетной оценки мощности тепловыделения при точечной сварке трением. Проведен анализ влияния скорости вращения и диаметра инструмента на максимальную температуру процесса.

ТОЧЕЧНАЯ СВАРКА ТРЕНИЕМ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. МОЩНОСТЬ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ. МАКСИМАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА.

Голод В. М., Орлова И. Г. АНАЛИЗ СТРУКТУРНОЙ МИКРОНЕОДНОРОДНОСТИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ ИХ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ.

Разработана компьютерная модель последовательного затвердевания литой заготовки при неравновесной кристаллизации многокомпонентных сплавов с учетом формирования дендритной структуры и перераспределения компонентов между фазами. Представлены результаты моделирования структурной микронеоднородности, возникающей при формировании дендритной структуры по сечению заготовок из низкоуглеродистых сталей при изменении содержания легирующих компонентов и условий теплоотвода.

КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ. СТРУКТУРНАЯ МИКРОНЕОДНОРОДНОСТЬ. НИЗКОУГЛЕРОДИСТАЯ СТАЛЬ. ДЕНДРИТАЯ СТРУКТУРА. КОАЛЕСЦЕНЦИЯ. МЕЖДУОСНЫЕ ПРОМЕЖУТКИ.

Русинов Р. В., Добрецов Р. Ю. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО ЦИКЛА ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ.

Рассмотрен вопрос расчета теплового процесса поршневых двигателей внутреннего сгорания. Предложен метод расчета, в котором минимизировано применение «эмпирических» коэффициентов. Предлагаемый метод расчета допускает оперативный анализ различных комбинаций действующих факторов и поиск их оптимальных соотношений.

ДИЗЕЛЬ. РАБОЧИЙ ЦИКЛ. ЭКОНОМИЧНОСТЬ.

Барышников С. О. УПРУГАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ. КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ.

Обсуждаются основные подходы для решения задач устойчивости различных систем и математические трудности, которые при этом возникают. При использовании статического метода для расчета на устойчивость защемленной прямоугольной пластины предлагается применить итерационный метод суперпозиции гиперболо-тригонометрических рядов по двум координатам. Выполнение граничных условий задачи можно обеспечить сколько угодно точно.

КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ. ИТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД. СУПЕРПОЗИЦИЯ РЕШЕНИЙ. ЗАЩЕМЛЕННАЯ ПРЯМОУГОЛЬНАЯ ПЛАСТИНА. ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ.

Зубов И. Н., Зубов С. В., Стрекопытов С. А., Стрекопытова М. В. УСТОЙЧИВОСТЬ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МНОГООБРАЗИЙ.

В статье рассмотрены проблемы устойчивости интегральных многообразий. Приведен ряд определений и теорем об устойчивости интегральных многообразий.

РЕЖИМ. ФУНКЦИЯ. МНОЖЕСТВО. СТЕПЕНЬ. ОПРЕДЕЛИТЕЛЬ. ТОЧКА. УСТОЙЧИВОСТЬ.

Барышников С. О., Сухотерин М. В. К РАСЧЕТУ СУДОВЫХ ДНИЩЕВЫХ ПЛАСТИН.

Задачи изгиба равномерно нагруженной прямоугольной пластины, защемленной по всему контуру и лежащей на упругом «винклеровском» основании, решена итерационным методом суперпозиции исправляющих функций. Поперечная нагрузка разлагается в двойной ряд Фурье. Исправляющие функции представлены парой гиперболо-тригонометрических рядов по двум координатам. Решение можно получить сколько угодно точное, увеличивая количество членов в рядах и число итераций. Приведены численные результаты.

ИЗГИБ. ЗАЩЕМЛЕННАЯ ПО КОНТУРУ ПРЯМОУГОЛЬНАЯ ПЛАСТИНА. УПРУГОЕ ОСНОВАНИЕ. РЯДЫ ФУРЬЕ. ИТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД. ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ.

Голиков В. А., Жарковский А. А., Топаж Г. И. ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЯ И АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛОПАСТНЫХ ГИДРОМАШИН.

На кафедре гидромашиностроения СПбГПУ разработаны методы и программное обеспечение для расчета течения и потерь в гидравлических турбинах и обратимых гидромашинах, центробежных и осевых насосах. Созданы комплексы программ автоматизированного проектирования проточных частей лопастных гидромашин. Программы работают под управлением программ-оболочек. Результаты расчетов и проектирования визуализируются. Программные комплексы апробированы при отработке проточных частей на заданные параметры.

ПРОГРАММА. РАСЧЕТ. ПОТЕРИ. КАВИТАЦИЯ. КПД. ХАРАКТЕРИСТИКА. ПОТОК. ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ГЕОМЕТРИЯ.

Наумов И. В. АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ УПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА ЗА ПРЕДЕЛАМИ ПЛОЩАДКИ НАГРУЖЕНИЯ.

В статье приведены преобразованные формулы расчета упругого полупространства. Произведен расчет напряжений за пределами площадки нагружения и построены графики горизонтальных вертикальных напряжений. Произведен расчет напряжений от нескольких площадок нагружения.

УПРУГОЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВО. ВЕРТИКАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ. ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ. ЗОНЫ НАПРЯЖЕНИЙ. ПЛОЩАДКИ НАГРУЖЕНИЯ.

Иголкин Б. И., Воловей А. Г., Мехтиев В. С., Василов В. В., Ребане К. Ю. ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ ПО СТАДИЯМ РАФИНАЦИИ.

В статье показано, что для каждой стадии очистки (рафинации) подсолнечного масла характерна своя определенная характеристическая частота внешнего синусоидального поля, при которой электропроводность масла (стадии очистки масла) остается постоянной, и она называется характеристической электропроводностью.

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ. РАСТИТЕЛЬНЫЕ МАСЛА. СТАДИИ РАФИНАЦИИ МАСЛА. ЧАСТОТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ.

Ястребов Ф. В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКИХ ДВИЖЕНИЙ ДЛЯ ИМИТАЦИИ РАЗРУШЕНИЙ МАКЕТОВ.

В статье рассмотрены проблемы теоретического представления вопросов конструкции и управления подвижными декорациями. Предложены пути поиска проектировочных расчетов.

ДЕКОРАЦИЯ. ОПРОКИДЫВАНИЕ. УПРАВЛЕНИЕ. КОЛОННА. ЗАКОН ДВИЖЕНИЯ. ВРЕМЯ ПАДЕНИЯ.

Наумов И. В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕАКЦИИ УПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА ПОД ШТАМПОМ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ.

Получена формула реакции упругого полупространства под центрально нагруженным прямоугольным штампом. Решение получено подбором функции из условия равновесия сил, приложенных к штампу, и реакции основания. Силы реакции, приложенные к полупространству, вызывают одинаковое перемещение под ней.

УПРУГОЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВО. ШТАМП. НАГРУЗКА. ПЛОЩАДКА НАГРУЖЕНИЯ. ПЕРЕМЕЩЕНИЯ. СРЕДНЕЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ.

Усманова Р. Р. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ.

В статье представлен подробный аналитический обзор основных результатов практического применения новых аппаратов для очистки газовых выбросов. Приведены конструктивные схемы и технические параметры аппаратов. Этот обзор может облегчить выбор оптимальной конструкции мокрого пылеуловителя при разработке систем газоочистки для конкретных промышленных условий.

ГАЗООЧИСТКА. ЭФФЕКТИВНОСТЬ. ВНЕДРЕНИЕ. СТЕПЕНЬ ОЧИСТКИ. ВИХРЕВЫЕ АППАРАТЫ.

Молодкина Л. М., Андрианова М. Ю., Чусов А. Н. СПЕКТРОФЛУОРИМЕТРИЯ В ИЗУЧЕНИИ ДИНАМИКИ РАЗЛОЖЕНИЯ БИООРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ.

В работе приведены результаты сравнительного изучения того, как изменяются во времени спектрофлуориметрические характеристики и стандартные показатели фильтратов, полученных при разложении модельных смесей растительных и бытовых отходов, а также эмиссия метана. Рекомендовано характеризовать динамику разложения биоорганических отходов показателем интенсивности флуоресценции фенольного люминофора.

БИОЭНЕРГЕТИКА. БИОГАЗ. РАСТИТЕЛЬНЫЕ И БЫТОВЫЕ ОТХОДЫ. МЕТАНОГЕНЕЗ. БИОДЕГРАДАЦИЯ. СПЕКТРОФЛУОРИМЕТРИЯ. ФЕНОЛЬНЫЙ ЛЮМИНОФОР.

Хвостова М. С. ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЛАВУЧЕЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ.

Статья посвящена вопросам вывода из эксплуатации плавучей атомной электростанции. На основе опыта утилизации атомных подводных лодок рассмотрены ключевые вопросы утилизации плавучего энергоблока. Основное внимание уделено обращению с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами плавучей атомной электростанции.

ПЛАВУЧАЯ АТОМНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ. ПЛАВУЧИЙ ЭНЕРГОБЛОК. ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ. УТИЛИЗАЦИЯ. ОТРАБОТАВШЕЕ ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО. РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ.



Гуменюк В. И., Кулинкович А. В. ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРАНСФОРМАЦИИ РАССЕЯННОЙ ЭНЕРГИИ АССОЦИИРОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ ВОДЫ НА ГЕНЕРАЦИЮ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА В РАСТВОРАХ СОЛЕЙ УРАНА.

Показано, что вода представляет собой сложную систему «ассоциированной» и «неассоциированной» воды. Введение в водные растворы соединений урана может катализировать генерацию активных форм кислорода в точках фазовых превращений, что позволит разработать экспрессный метод контроля уранилов в воде.

ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЬ. ГЕНЕРАЦИЯ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА. СВЯЗАННАЯ ВОДА. СОЕДИНЕНИЯ УРАНА. МЕТАЛЛЫ ПЕРЕМЕННОЙ ВАЛЕНТНОСТИ.

Попов В. Ю., Федосовский М. Е., Туманов А. Ю. МОНИТОРИНГ ИЗОТОПОВ КСЕНОНА ДЛЯ ЗАДАЧ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АВАРИЙНЫХ И ПРЕДАВАРИЙНЫХ СОСТОЯНИЙ НА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ.

При функционировании ядерно-энергетических объектов происходит выброс большого количества изотопов ксенона. Мониторинг данных изотопов позволяет дистанционно производить диагностирование аварийных состояний на ядерных энергетических объектах.

ИЗОТОПЫ КСЕНОНА. МОНИТОРИНГ. ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ. АППАРАТУРНЫЙ КОМПЛЕКС.

Куракин А. С., Холодкевич С. В., Пурвина С., Барда И., Римша Э., Кулинкович А. В. ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АКВАТОРИЙ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ.

В работе представлены результаты экспериментального исследования, выполненного в рамках проекта HYDROTOX «Внедрение инновационных экотоксикологических методов для идентификации влияния загрязнения естественного и антропогенного происхождения в латвийских территориальных водах» (HYDROTOX Nr. 2009/0226/1DP/1.1.2.0/09/APIA/VIAA/080) за период с 15.05.2011 по 15.10.2011.

ЭКОЛОГИЯ. АКВАТОРИЯ. БИОИНДИКАЦИЯ. МЕТОД. ОЦЕНКА.

Доброборский Б. С., Гуменюк В. И., Федосовский М. Е. АНАЛИЗ ПРИЧИН АВАРИИ НА САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС.

В работе представлены исследования по установлению причин многочисленных нарушений, допущенных руководящими работниками СШГЭС и рассматриваемых как результат «человеческого фактора». Выявлены многочисленные ошибки как разработчиков проекта ГЭС и гидроагрегатов, так и служб эксплуатации.

ФАКТОР. ПРИЧИНА. ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ. ОШИБКИ. ГИДРОАГРЕГАТ. ПРОЕКТ. КОНТРОЛЬ.

Кожевников Н. М. ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОГО СОВЕТА ПО ФИЗИКЕ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕХОДА К «УРОВНЕВОЙ СИСТЕМЕ» ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Представлены итоги деятельности Научно-методического совета по физике Минобрнауки РФ в 2002–2012 гг. Обсуждается роль этого совета в решении актуальных проблем преподавания физики в российской средней и высшей школе. Приводится Обращение совета к ректорам вузов страны.

ФИЗИКА. ОБЩИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ЕСТЕСТВЕНОНАУЧНЫЕ ДИСЦИПЛИНЫ. ПРИМЕРНЫЕ ПРОГРАММЫ. ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ СТАНДАРТЫ 3-ГО ПОКОЛЕНИЯ. НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ СОВЕТЫ.

Дмитриев А. Г., Козелецкая Т. А., Герман Е. А. О ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ГУМАНИТАРНЫХ ОБЛАСТЯХ ЗНАНИЙ.

Рассмотрен вопрос о корректной записи математических выражений с размерными величинами. Показано, что в случаях, когда решение дифференциального уравнения модели записано математически корректно в отношении размерных величин, то даже при отсутствии начальных и граничных условий и, следовательно, невозможности определить константы интегрирования имеется возможность интерпретировать их на основе свойств полученных математических функций. В этой ситуации константа интегрирования приобретает статус нового параметра модели, не содержащегося в исходном дифференциальном уравнении, что в свою очередь расширяет понятийный аппарат, относящийся к объекту моделирования.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ. ИМЕНОВАННЫЕ ВЕЛИЧИНЫ. РАЗМЕРНОСТЬ. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ. ФОРМАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ.

ABSTRACTS

KEYWORDS

Frolov V. Y., Korotkov A. V. ABOUT THE IMPROVING OF ACCURACY OF DEFINITION OF LOAD LOSSES OF ELECTRICAL ENERGY AND STRUCTURE OF ACTUAL LOSSES.

The real ways to improve the accuracy of the most important components of reporting losses of electrical energy were proposed. Refinement of the coefficients used in determining the quasi-permanent losses in transformers, load and commercial losses of electricity was carried out by means of calculations and by means of the experimental method.

CITY POWER GRIDS. POWER LOSSES. LOSSES OF IDLE RUN OF TRANSFORMERS. LOAD LOSSES. BUSINESS LOSSES.

Sysoev A. V., Smolovik S. V. WAYS FOR PREVENTION OF THE DEVELOPMENT OF EMERGENCY STATE POWER SYSTEM IF ONE INTERSYSTEM CONNECTION IS FAULTED.

In the article the weak cross-section of power system which is included two parallel lines 500 kV and 220 kV is analyzed. The development of system fault in case of one of the parallel lines turned off is simulated and for the reason this results any arrangements is suggested for prevention fault.

PARALLEL LINES. FAULT. OVERLOAD. REACTIVE POWER COMPENSATION. ACTIVE POWER.

Epifanov A. A., Kirillov A. I., Rassokhin V. A. GAS-DYNAMIC COMPUTATION OF LOW FLOW RATE TURBINES BLADE CASCADES CHARACTERISTIC.

The results of computation fluid dynamics program ANSYS CFX settings investigation with regard to three-dimensional low flow rate LPI turbines blade cascades flow modeling are presented. The guidelines for calculation settings selection, which ensure the sufficient modeling results accuracy, are defined. The LPI blade cascades calculations are verified by experimental data.

COMPUTATION FLUID DYNAMICS. ANSYS CFX. LPI LOW FLOW RATE BLADE CASCADES.

Vasilenko G. V., Amosov N. T. INVESTIGATION OF CENTRAL HEATING HEATERS ON POWER UNIT T-180-130 AND SUGGESTIONS TO REDUCE THEIR DAMAGEABILITY.

The paper analyse of horizontal heater tubes made of austenitic stainless steel 12Cr18Ni10T. The root cause of tube cross cracking close to tube-boards is thermal-blow when start a heater. Recommendations are given to eliminate the cracking problem.

CENTRAL HEATING HEATERS. TUBES OF STAINLESS STEEL. CROSS CRACKING.

Korovkin N. V., Kalashnicov V. S., Kirpanev A. V. CYLINDRICAL SCANNING IN TASKS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY.

Methods of the defining external electromagnetic fields of electro and radio technical devices based on cylindrical probing some components electrical or magnetic fields are presented. Devices which are investigated consider being the sources of noise immunity issue. Expressions of identifying electromagnetic fields for ultra wideband and quasi-stationary cases received.

INVERSE PROBLEM. ELECTROMAGNETIC FIELD. CYLINDRICAL COORDINATES. MEASUREMENT SURFACE. MEASUREMENT PROBE. NEAR AND FAR FIELDS.

Epifanov A. A., Kirillov A. I., Rassokhin V. A. COMPUTATION OF THREE-DIMENSIONAL FLOW AT LOW FLOW RATE TURBINES STAGES.

The problems of three-dimensional flow modeling at low flow rate LPI stages are considered. The low rate stages rotor blade and nozzle cascades modes of connection realized in the ANSYS CFX program are researched. The LPI stage calculations are verified by experimental data.

COMPUTATION FLUID DYNAMICS. ANSYS CFX. LPI LOW FLOW RATE STAGES.

**Loginov S. Y. LOWERING INTERACTION RADIAL FORCES IN THE BEARINGLESS RELUCTANCE MOTOR.**

The advantages of bearingless motors are pointed out. An analytical model of the bearingless reluctance motor is obtained. The algorithm of definition of suspension control currents for decrease radial forces interference were created.

BEARINGLESS RELUCTANCE MOTOR. MATHEMATICAL MODEL. RADIAL FORCE. CONTROL CURRENT.

Tsygankova Y. S. DECOMPOSITION APPROACH OF HEAT LOSSES CALCULATION IN HEAT SUPPLY NETWORK.

Decomposition approach of heat losses calculation on pipelines taking into account real isolation and operation conditions of heat supply network is proposed. Calculation heat losses are compared with engineering and normative losses. Potential of heat saving in transport system of heat energy unaccounted in usual calculation methods of heat losses is shown.

DECOMPOSITION APPROACH. THERMAL ISOLATION. TRANSPORT HEAT LOSSES. UPNORMAL CONDITIONS OF HEAT SUPPLY NETWORK. PIPELINE ISOLATION DISCONTINUITY. EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY.

Ustinov D. A., Konovalov J. V., Plotnikov I. G. CERTIFICATION OF ELECTRIC LOAD OIL AND GAS COMPANIES.

The questions of rational energy consumption of oil and gas companies, through certification of electrical loads. Constructed profiles of individual substation load graphs and defined profiles averaged schedules of oil and gas companies as a whole, by summing the individual profiles of graphs obtained by the calculation of substation-diagrams coefficients of the form, fill, uniformity, determination of maximum, minimum and average loads for tariff zones.

POWER CONSUMPTION. CERTIFICATION. DIAGRAMS OF ELECTRIC LOADS. GENERALIZED DIAGRAM OF POWER SUPPLY. FACTORS FORMS FILLED OUT. EVEN.

Tananaev A. V. FOR LIQUID METAL FUSION REACTOR IN THE BLANKET.

The problems of using liquid metal blanket and contact devices of thermonuclear reactors. The different methods to reduce the pressure drop in liquid-metal coolant tichenii in a magnetic field for the main reactor blanket fixtures. The peculiarities of the flow of conductive media in high magnetic fields on the basis of experimental data the conditions of transition to the linear flow regime in the characteristic elements of the duct blanket, consider ways of heat transfer in the blanket, allowing to reduce thermomechanical stresses and reduce the flow of molten metal by aligning the profile of temperature and growth heat transfer coefficient.

LIQUID METAL. MAGNETIC FIELD. HEAT TRANSFER COEFFICIENT. BLANKET. HYDRAULIC RESISTANCE

Petrov N. V. INVESTIGATION OF LOCAL ENERGY RELEASE IN WATER NEAR THE FREE SURFACE.

An algorithm for numerical simulation of underwater explosions in the presence of the interface was offered. Processes accompanying an underwater explosion near the free surface were investigated.

UNDERWATER EXPLOSION. RIEMANN PROBLEM. LIQUID-GAS INTERFACE. COMPRESSION AND RAREFACTION WAVES.

Batukhtin A. G., Safronov P. G., Kirillov M. V. OPTIMIZATION OF PRE-HEATING COLD AIR TO THE BOILER AIR HEATERS (ILLUSTRATED KHARANORSKAYA TPP).

Optimization of the preliminary heating of air, including different technical decisions, choice of the most optimum variants taking into account the least capital investments, is considered in the article. The offered scheme solution allows substantially to increase efficiency and profitability of production of electric power. Possibility of work of caldrons of Kharanorskoy GRES is considered without heaters, and also the use of steam for the preliminary heating of cold air of more low parameters.

AIR HEATERS. WASTE GASES. HEATER. FLOW OF HEAT. COAL. CHP. ENERGY SAVING.

Mityugin A. A., Yakovlev V. I. THE STUDY OF HIGH ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE IN THE ELECTRICAL NETWORK WHEN DISCONNECTING THE SHORT-CIRCUIT.

The experimental setup for the generation of electromagnetic interference, which arise in the network when you disable the short circuit current. Completed study of their influence on the secondary voltage pulsed power supply.

EXPERIMENT. STUDY. ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE. DISABLE THE SHORT-CIRCUIT. SWITCHING POWER SUPPLY.

Anisimova E. B., Bogdanov J. V. THE PERSPECTIVE INNOVATIVE DIRECTION OF USEING HIGH-TEMPERATURE GAS-COOLED REACTORS IN FLOATING NUCLEAR STEAM POWER PLANTS.

The article considers the possibilities of using perspective high temperature gas-cooled reactors (HTGR) in the floating nuclear steam power plant (FAPP). There are the basic advantages of this type of reactors in comparison with others in this article. There is reliability and security of FAPP with HTGR in conditions of using them in remote areas.

FLOATING NUCLEAR STEAM POWER PLANT. HIGH TEMPERATURE GAS-COOLED REACTOR. SECURITY OF NUCLEAR STATION. RELIABLE OPERATION

Rumaherang W. M., Topazh G. I., Zakharov A. V. METHOD OF CALCULATION FOR DETERMINING CAVITATION PERFORMANCE OF HYDRAULIC TURBINES.

The technique of calculating the cavitation performance of hydraulic turbines. Performed computational studies of cavitation performance of radial-axial turbine PO230 and provides a comparison of calculation results with experimental data.

HYDRAULIC TURBINES. CAVITATION. EFFICIENCY. PERFORMANCE. PROGRAM. CALCULATION. SIMULATION. PRESSURE.

Rassokhin V. A., Zabelin N. A., Matveev Y. V., Kharisov I. S. METHODS FOR EXPERIMENTAL STUDIES OF LOW POWER TURBINES STEPS TO STAND POLYTECHNIC UNIVERSITY.

The method of the experiment, examined the equipment and data processing.

MICROTURBINES. GAS TURBINE POWER PLANT. DEVELOPMENT. ENERGY. EXPERIMENTAL METHODS.

Shelomov V. B., Dobretsov R. Yu. REFINEMENT OF THE SWIVEL MOVEMENT MODEL OF THE TRACKED VEHICLE.

Suggested a mathematical model of the swivel movement, that take into account slipping motion on the supporting face, and that uses conceptual issues of the tracklaying vehicle theory, and that allow to factor in phenomenon of the partial drift. The sequence of computations and relevant special features of the results are illustrated in example.

TURN OF THE TRACKLAYING VEHICLE. TRACKED VEHICLE MOTION THEORY. SIDEWAY SKIDDING.

Dudnik T. A., Bogov I. A. ABOUT RATIONING OF CALCULATIONS OF THREADED CONNECTIONS ON THE FRAGILE STRENGTH.

A comparison of known solutions definition of the stress intensity factor of threaded connections were spent. Developed the proposal for calculating of the threaded connections on the fragile strength.

CALCULATION. STRESS INTENSITY FACTOR. CRACK. STRENGTH.

Maslov V. I., Arustamyan A. I. IMPROVING PRIOZVODSTVA PISTON RINGS.

The article discusses the problem of improving the quality of piston rings. The technology of automated control of the ladle with molten metal in the manufacture of castings, providing reduction of deviations from the characteristics of piston rings required.

MANAGEMENT. QUALITY. PISTON RINGS. AVTOMATITSIYA. CONTROL.

Dudnik T. A., Bogov I. A., Laskin A. S. DETERMINATION MAXIMUM ALLOWABLE DEFECT SIZES OF THE WORKPIECES LARGE ROTOR SHAFTS.

According to the submitted specification, the defects are considered as single, interacting and integrated. The allowable size of defects shaft turbine generator are determined.

SHAFT. DEFECT. STRENGTH. THE STRESS STATE.

Radkevich M. M., Fomin D. U. THE PHYSICAL MODELLING OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS UNDER SEMIHOT FORGING.

Questions of the choice about deformational and thermal parameters of the physical modeling under semihot forging in the conditions of laboratory were considered. The choice of the optimal model configuration for forging pieces was proved. The estimation of the structure and properties similarities which metal have received under factory and laboratory production conditions was made. The conclusion about the efficiency of the physical modeling process was made.

SEMIHOT FORGING. PHYSICAL MODELING. CONDITIONS OF THE PROCESS. ALLOYED STEEL. STRUCTURE AND PROPERTIES.

**U sh a k o v A. P., INFORMATIVITY OF THE LASER VIBRATION DIAGNOSTICS OF MACHINES AND CONSTRUCTIONS.**

In this article it is described the advantages of the laser contactless vibration diagnostics of machines and constructions condition allowing early defect detection due to ability of getting access to every point located on the machine and construction casing outside surface and vibration measurement frequency range broadening. Examples concerning laser diagnostics of aircraft engine parts in test bed conditions with the utilization of spectral and statistical processing methods are shown in this article.

LAZER VIBRATION DIAGNOSTICS OF MACHINE. GAS TURBINE ENGINE.

O rischenko A. S., Kondratyev S. Yu., Anastasiadi G. P., Fuks M. D., Petrov S. N. FEATURES OF STRUCTURAL CHANGES IN HEAT-RESISTANT ALLOY 45X26H33C2B2 AT OPERATING TEMPERATURES. RECORD 1. CAST STATE.

Investigated were the structure, the phase composition and the distribution character of alloying elements in the structure of heat-resistant alloy 45X26H33C2B2 in the cast state. Revealed were liquation of chemical elements in the γ -solid solution and carbide eutectic in the alloy and the formation of inclusions consisting of both carbides of niobium and nitrides of titanium. Thermodynamic instability of the cast structure of the investigated alloy was justified.

CAST HEAT-RESISTANT ALLOYS. MICROSTRUCTURE. PHASE COMPOSITION. LIQUATION. STRUCTURAL STABILITY.

P opov I. O., Mitrofanov Y. A. SCIENTIFIC AND PRACTICAL FOUNDATIONS OF AEGIRINE CONCENTRATE – INDUSTRIAL WASTE OPEN SOCIETY «Apatite» AS THE INTEGRATED FLUX IN PYROMETALLURGY OF COPPER.

The article considers the problems associated with using of silica flux in copper pyrometallurgical processes. We describe the ability to use of the Khibinian aegirine concentrate as a flux in pyrometallurgical processes the metallurgy of copper in order to improve their basic technical and economic indicators.

METALLURGY OF COPPER. QUARTZ FLUX. AEGIRINE CONCENTRATE. FIRE REFINING. CONVERSION. DEPLETION OF SLAG.

O kh a p k i n K. A. THEORETICAL ANALYSIS OF HEAT TRANSFER PROCESSES DURING SPOT STIR WELDING.

Theoretical method of calculation of heat source power during spot stir welding is represented. The analysis of influence of rotation speed and diameter of instrument on maximum temperatures was carried out.

SPOT STIR WELDING. MODELLING. POWER OF HEAT SOURCE. MAXIMUM TEMPERATURE.

G o l o d V. M., O r l o v a I. G. ANALYSIS OF STRUCTURAL MICROINHOMOGENEITY IN LOW CARBON STEELS BASED ON A COMPUTER MODELING OF IT'S SOLIDIFICATION.

A computer model of progressive casting solidification at non-equilibrium crystallization of multicomponent alloys is developed taking into account the formation of dendritic structure and redistribution of components between phases. The results of modeling of structural microinhomogeneity which arises during the formation of dendritic structure in the cross section of low-carbon steel castings under changing the content of alloying elements and heat-removal conditions are presented.

COMPUTER ANALYSIS. STRUCTURAL MICROINHOMOGENEITY. LOW CARBON STEEL. DENDRITE STRUCTURE. COALESCENCE. DENDRITE ARM SPACING.

R us i n o v R. V., D o b r e t s o v R. Yu. MATHEMATICAL MODEL OF THE RECIPROCATING INTERNAL COMBUSTION ENGINE THERMAL CYCLE.

Examined an issue related to the calculation of the reciprocating internal combustion engine thermal process. Suggested methodology for calculation in which minimized the usage of empirically determined coefficients. Suggested method for calculation offer an effective way to analyze different combinations of influencing factors and the search of optimum ratio.

DIESEL ENGINE. RUNNING CYCLE. PROFITABILITY.

B a r y s h n i k o v S. O. ELASTIC STABILITY. CRITERIA FOR STABILITY.

The basic approaches to solve the stability problems of various systems and mathematical difficulties. That arise here. When using a static method to calculate the stability of a clamped rectangular plate is proposed to apply the iterative method of superposition of hyperbolic-trigonometric series in two coordinates. The boundary conditions of the problem can be done any number of precision.

STABILITY CRITERION. ITERATIVE METHOD. SUPERPOSITION OF THE CLAMPED RECTANGULAR PLATE. EXACT SOLUTION.

Zubov I. N., Zubov S. V., Strecopitov S. A., Strecopitova M. V. STABILITY INTEGRAL MULTITUDES.

In giving article is look the problems of stability integral multitudes. Is bring row definitions and theorems about stability integral multitudes.

REGIME. FUNCTION. MULTITUDE. DEGREE. DEFINITION. POINT. STABILITY.

Baryshnikov S. O., Suhoterin M. V. CALCULATION OF SHIP BOTTOM PLATES.

Problem of bending of uniformly loaded rectangular plate, clamped around the contour and lying on an elastic «Winkler» basis, is solved by the iterative method of superposition correcting functions. The transverse load can be expanded in double Fourier series. Correcting the function represented by a pair of hyperbolic-trigonometric series in two coordinates. The solution can be as much as accurate by increasing the number of members in the ranks and the number of iterations. Numerical results.

BENDING CLAMPED RECTANGULAR PLATE TO CONTOUR. ELASTIC FOUNDATION. FOURIER SERIES. ITERATIVE METHOD. EXACT SOLUTION.

Golikov V. A., Zharkovsky A. A., Topazh G. I. SOFTWARE TOOLS FOR NUMERICAL CALCULATIONS OF THE CURRENTS AND COMPUTER-AIDED DESIGN OF THE BLADED HYDROMACHINES.

On hydromachine-building department of SPbGPU different methods and the software tools are developed for calculation of currents and losses in hydroturbines and reversible hydromachines, centrifugal and axial pumps. Computer-aided design (CAD) software of flowing passages of the bladed hydromachines are created. Software tools has pre-processing and post-processing interface, calculations and designing results are visualized, developed software tools are approved at execution of hydromachine flowing passages on the set parameters.

PROGRAM. CALCULATION. LOSSES. CAVITATION. EFFICIENCY. PERFORMANCE. STREAM. DESIGN GEOMETRY.

Naumov I. V. ANALYSIS OF THE STRESSED STATE OF AN ELASTIC HALF-SPACE OFF-SITE LOADING.

The paper presents formulas for calculating the transformed elastic half-space. The calculation of the stress off-site loading, and the graphs of horizontal vertical stresses. The calculation of stresses from several sites loading.

ELASTIC HALF-SPACE. VERTICAL STRESS. HORIZONTAL STRESS. STRESS ZONE. LOADING THE SITE.

Igolkin B. I., Volovoy A. G., Mekhtiev V. S., Vasipov V. V., Rebane K. Y. THE ELECTRO-MAGNETIC STATE OF VEGETABLE OILS ON STAGE REFINING.

In this paper we show that for each stage of purification (refining) of sunflower oil is characterized by its own specific characteristic frequency of the external sinusoidal field at which the electrical conductivity of oil (oil purification step) remains constant, and it is a characteristic electrical conductivity.

ELECTRICAL. VEGETABLE OIL. STAGE OIL REFINING. FREQUENCY OF ELECTROMAGNETIC OSCILLATIONS.

Yastrebov P. V. SIMULATION OF PLANE MOTION MODEL FOR SIMULATION OF DESTRUCTION.

The clause considers the problem of the theoretical presentation of issues of design and control of mobile scenery. The ways of searching the design calculations.

SCENERY. ROLLOVER. MANAGEMENT. COLUMN. THE LAW OF MOTION. FALL TIME.

Naumov I. V. DETERMINATION OF REACTION ELASTIC HALF-SPACE UNDER THE DIE RECTANGULAR SHAPE.

A formula is obtained by reaction of an elastic half-space centrally loaded rectangular stamp. The solution is obtained by selecting a function from the equilibrium condition of forces applied to the stamp and the reaction of the base. Reaction force applied to the half-space, call the same movement under it.

ELASTIC HALF-SPACE. STAMP. LOAD. LOAD PLATFORM. MOVING. MOVING AVERAGE.

Usmanova R. R. INTENSIFICATION OF PROCESS OF CLEARING OF SMOKE GASES AT MODERNIZATION OF SYSTEMS DUST SEPARATION.

In article is presented the detailed state-of-the-art review of primary results of practical implementation of new devices for clearing gas emissions. Constructive diagrams and technical parameters of devices are resulted.

The present review will help to facilitate a choice of an optimum design of a wet deduster at system engineering gas purification for specific industrial conditions.

WET GAS CLEANING. EFFICIENCY. INTRODUCTION. SEPARATION. EFFICIENCY. VORTICAL DEVICES.



Molodkina L. M., Andrianova M. Yu., Chusov A. N. SPECTROFLUORIMETRY IN STUDYING THE DYNAMICS OF THE DEGRADATION OF BIO-ORGANIC WASTE.

The paper presents the results of a comparative study of changes over time of spektrofluorimetry characteristics and standard features of filtrate obtained during the degradation of model mixtures of plant and household waste, as well as methane emission. It was recommended to characterize the dynamics of the degradation of bio-waste by the fluorescence intensity of phenol phosphor.

BIOENERGETICS. BIOGAS. PLANT AND HOUSEHOLD (MUNICIPAL) WASTE. METHANOGENESIS. BIODEGRADATION. SPECTROFLUORIMETRY. PHENOLIC PHOSPHOR

Khvostova M. S. ENGINEERING-ECOLOGICAL ASPECTS OF A DECOMMISSIONING OF THE FLOATING NUCLEAR POWER PLANT.

Article is devoted questions of a decommissioning of a floating nuclear power plant. On the basis of experience of dismantling of nuclear submarines key questions of dismantling of the floating power unit are considered. The basic attention is given the management of a spent nuclear fuel and a radioactive waste of a floating nuclear power plant.

FLOATING NUCLEAR POWER PLANT. FLOATING POWER UNIT. DECOMMISSIONING. DISMANTLING. SPENT NUCLEAR FUEL. RADIOACTIVE WASTE.

Gumenyuk V. I., Kulinkovich A. V. INFLUENCE OF PROCESSES OF TRANSFORMATION OF ABSENT-MINDED ENERGY THE ASSOCIATED CONDITIONS OF WATER ON GENERATION ACTIVE FORMS OF OXYGEN IN SOLUTIONS OF SALTS OF URANIUM.

It is shown that water represents difficult system of the «associated» and «not associated» water. Introduction in water solutions of connections of uranium can catalyze generation of active forms of oxygen in points of phase transformations that will allow to develop an express quality monitoring of uranium in water.

CHEMILUMINESCENT EXPRESS-CONTROL. GENERATION OF ACTIVE FORMS OF OXYGEN. CONNECTED WATER. CONNECTIONS OF URANIUM. METALS OF VARIABLE VALENCY.

Popov V. Yu., Fedosovskiy M. E., Tumanov A. Yu. MONITORING OF XENON ISOTOPES FOR THE TASKS OF DETERMINATION ACCIDENTS ON THE NUCLEAR FACILITIES.

During the nuclear facilities operation a lot of xenon releases occurred. Monitoring of xenon's isotopes gives possibility to determine accidents on the nuclear facilities remotely.

XENON ISOTOPES. MONITORING. NUCLEAR FACILITIES. INSTRUMENTS SYSTEM.

Kurakin A. S., Kholodkevich S. V., Purviņa S., Bārda I., Rimša E., Kulinkovich A.V. ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL BALTIC SEA.

This paper presents the results of the pilot study carried out within the framework of the project HYDROTOX: «introduction of innovative methods to identify the impact of ecotoxicological pollution of natural and anthropogenic origin in Latvian territorial waters» (HYDROTOX Nr. 0226/2009/1.1.1.2.0/1DP/09/APIA/VIAA/080) for the period from 15.10.2011 to 15.05.2011.

ECOLOGY. WATER AREA. BIOINDICATION. METHOD EVALUATION.

Dobroborskij B. S., Gumenyuk V. I., Fedosovskij M. E. ANALYSIS OF THE CAUSES OF THE ACCIDENT AT СШГЭС.

This paper presents a study on the causes of the many violations committed by senior СШГЭС as the result of «human factor». As a result of work performed innumerable mistakes ГЭС project and hydraulic units, and management services

A REASON. HYDROELECTRIC POWER STATION. HYDROUNIT. ERRORS. PROJECT. CONTROL.

Kozhevnikov N. M. THE SCIENTIFIC-METHODICAL COUNCIL ACTIVITY UNDER TRANSITION TO “LEVEL SYSTEM” OF HIGH EDUCATION.

We present the results of the Scientific and Methodological Council on Physics Education and Science of Russian Federation in 2002–2012 years. The role of this council in solving actual problems of physics teaching in Russian secondary and tertiary levels. An Appeal to the Board of rectors of universities in the country.

PHYSICS. GENERAL MATHEMATICAL AND NATURAL SUBJECTS. SUBJECT PROGRAM CASES. STATE EDUCATION STANDARTS OF THE 3-D GENERATION. SCIENCE-METHODICAL COUNCILS.



Dmitriev A. G., Kozeletskaja T. A., German E. A. ABOUT THE ADDITIONAL POSSIBILITIES OF MATHEMATICAL MODELING IN HUMANITARIAN FIELDS OF KNOWLEDGE.

Is considered the question on correct record of mathematical expressions which include a dimensional quantities. It is shown that in cases where the solution of differential equations of the model is written mathematically correct with regard to dimensional quantities, even in the absence of initial and boundary conditions and, therefore, when impossible to determine the constants of integration, it is possible to interpret them based on the properties of the mathematical functions. In this situation, the integration constant acquires the status of the new model parameter what is not contained in the original differential equation, which, in turn, expands the conceptual apparatus relating to the object modeling.

THE MATHEMATICAL MODEL. DIFFERENTIAL EQUATIONS. NAMED VALUE. DIMENSION. UNITS. FORMAL VERIFICATION.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

№ 1 (142) 2012

НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Учредитель – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Издание зарегистрировано в Госкомпечати РФ, свидетельство № 013165 от 23.12.94

Редакция

академик РАН *Ю.С. Васильев* – председатель редакционной коллегии
д-р ист. наук профессор *Р.В. Дегтярева* – заместитель председателя
д-р техн. наук профессор *В.Н. Боронин* – заместитель председателя
канд. техн. наук доцент *Л.В. Спиридонова* – научный редактор, корректор
Н.П. Измайлова – помощник выпускающего редактора
О.А. Матенев – технический секретарь

Телефон редакции (812) 294-47-72

E-mail:ntv-nauka@spbstu.ru

Компьютерная верстка *Е.А. Типовой*

Подписано в печать 26.03.2012. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 40,75. Тираж 1000. Заказ 57.

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; ТРANSPORT; 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 ученое звание профессора. Рецензия должна быть ОБЯЗАТЕЛЬНО заверена в отделе кадров. Рецензент несет ответственность за содержание статьи, достоверность представленных материалов.

При необходимости редакция может потребовать представления акта экспертизы.

Все материалы должны быть представлены по электронной почте: e-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

2.3. Рассмотрение материалов

Представленные материалы (п. 2.2) первоначально рассматриваются редакционной коллегией и передаются на рецензирование. После одобрения материалов, согласования различных вопросов с автором (при необходимости) редакционная коллегия сообщает автору решение об опубликовании статьи, в противном случае она направляет автору мотивированный отказ.

При отклонении материалов из-за нарушения требований по оформлению или как не отвечающих тематике журнала материалы не публикуются и не возвращаются.

Редакционная коллегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

Публикация материалов аспирантов осуществляется бесплатно в соответствии с очередностью.

При поступлении в редакцию значительного количества статей их прием в очередной номер может закончиться ДОСРОЧНО. Более подробную информацию можно получить по телефону/факсу редакции:

(812) 294-47-72 (с 10 до 18 часов, Олег Александрович) или по e-mail: ntv-nauka@spbstu.ru