

4(110)/2010



Научно-технические ведомости СПбГПУ

НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

Министерство образования и науки РФ
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбПУ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

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

СЕРИЯ «НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ»

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

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

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

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

Журнал издается в пяти сериях:

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

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

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

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

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

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

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2010

Содержание

<i>Президенту и генеральному конструктору РКК «Энергия» члену-корреспонденту РАН В.А. Лопоте — 60 лет</i>	9
---	---

Материалы конгресса «Профессиональное образование, наука, инновации»

Максимов А.С. Высшая школа Санкт-Петербурга: курс на модернизацию	11
Окрепилов В.В. Интеграция академической и вузовской науки в инновационном процессе	20
Лобко В.Н. Проблемы математической и естественно-научной подготовки в инженерном образовании: исторический опыт и современные вызовы.	23

Энергетика и электротехника

Петреня Ю.К., Сайкова М.С. Влияние технологических дефектов на прочность и ресурс цилиндрических элементов ТЭС при нестационарных температурных режимах	27
Петин В.В., Батухтин А.Г., Калугин А.В., Сафронов П.Г. Современные технологии использования электрической энергии в системах централизованного теплоснабжения	32
Андреев М.А., Водовозов А.М. Идентификация параметров асинхронного электропривода по переходным процессам в силовой цепи	38
Светозарская С.В., Кубышкин Л.И. Методика параметрического моделирования объектов возобновляемой энергетики	42
Батухтин А.Г. Особенности моделирования суточных режимов работы установок гелионагрева на абонентских водах потребителей тепловой энергии	50
Григорьев К.А. Закономерности процесса измельчения топлива в мельницах: теория и эксперимент ...	58
Шевченко Н.Ю. Анализ прогнозируемых механических нагрузок на провода реконструируемого участка воздушной линии электропередачи	66
Шакиров М.А., Андрущук В.В., Ван Сынань. Достоверность 2Т-образной схемы замещения силового трансформатора	72
Шакиров М.А., Ван Сынань. Уточненная 2Т-образная схема замещения трансформатора	79
Сергеев В.В., Алешина А.С. Использование твердых бытовых отходов в качестве топлива	91
Усынин Ю.С., Остроухов В.В. Применение индивидуального электропривода в механизмах подачи станов холодной прокатки труб	96
Андреев К.Д., Полищук В.Г., Рассохин В.А., Соколов Н.П. Исследование гидравлических характеристик и теплоотдачи в прямых щелевых каналах	100

Машиностроение

Нусратуллин Э.М. Упрочнение хвостовика лопатки компрессора за счет армирования высоко-модульными волокнами	107
Русинов Р.В., Добрецов Р.Ю. Сравнительный анализ эффективности работы дизелей с газотурбинным и механическим наддувом	111
Борисевич А.В., Гедько П.Ю., Смирнов А.Б. Микроробот на базе сферического шарнира с пьезоприводом	116

Иванов В.Ю. О влиянии конечных размеров шарнира на решение контактной задачи	124
Цветкова Г.В., Скотникова М.А., Белов Ю.М., Крылов Н.А., Иванов Е. К. Структурное и фазовое состояния наплавочных материалов, предназначенных для рабочих лопаток смесителей	129
Шлепетинский А.Ю., Манжула К.П. Коэффициенты интенсивности напряжений в крестовом сварном соединении с непроваром	137
Левина Г.А., Дрокин В.В. Нагрузочные характеристики лепестковых радиальных подшипников турбомашин	146
Галёркин Ю.Б., Солдатова К.В., Дроздов А.А. Уточнение алгоритма расчета параметров потока в центробежной компрессорной ступени	150
Грязнов Н.А., Кириченко В.В., Кочкарев Д.А. Мониторинг факторов околоземного пространства на базе сверхмалых космических аппаратов	157

Металлургия

Рудской А.И., Кокорин В.Н. Внедрение технологии прессования дисперсных металлосодержащих материалов на основе железа с использованием жидких фаз	163
Носов В.В., Жильцов, Лаврин В.Г. Неразрушающий контроль качества заготовок для производства горячекатаной полосы методом акустической эмиссии	170

Материаловедение

Туричин Г.А., Цибульский И.А., Кузнецов М.В., Сомонов В.В., Валдайцева Е.А. Исследование формирования пористости алюминиевых сплавов при лазерной и лазерно-дуговой сварке	175
Туричин Г.А., Цибульский И.А., Кузнецов М.В., Сомонов В.В. Гибридная лазерно-дуговая сварка металлов больших толщин	181
Фролов В.Я., Смирнова Е.А., Юшин Б.А. Применение ускоренного индукционного нагрева для повышения эксплуатационных свойств плазменных покрытий	187
Радкевич М.М., Новиков А.И., Фомин Д.Ю. Формирование структуры сталей в условиях программной механико-термической обработки	192
Иваньков С.А., Башкарев А.Я. О долговечности и прочности композитов	196
Грачев А.А., Соколов С.А. Устойчивость пластин с ребрами	200

Природопользование

Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Латышев Н.К. Геоэкологические подходы к разработке информационно-аналитических систем для гидромелиоративного строительства и природообустройства	205
Горбовская А.Д., Бахматова К.А., Матинян Н.Н. Состояние почвенного покрова гидрологического заказника «Ламмин-Суо»	211
Маркелова Е.А. Экспериментальное исследование процесса биодеструкции нефтяных загрязнений водной среды	216
Стрелец К.И. О характеристиках пыли, используемых при расчете эффективности пылеудаления в циклоне	222

Строительство

Романченко О.В. Геодезическое обеспечение строительных проектов	227
Тедеев Т.Р., Рутковский А.Л. К вопросу целесообразного перераспределения контактных напряжений	232

Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Сыров А.А., Храмов А.В. Критерии оценки неблагоприятных последствий радиационных аварий ..	237
Гуменюк В.И., Храмов А.В. Проблемы учета отработанного ядерного топлива транспортных установок	241

Туманов А.Ю., Домаков В.В., Кондратьев В.Г. Техногенные факторы воздействия и требования к защите энергетических народнохозяйственных объектов	245
Атоян Г.Л., Кондратьев В.Г. Принципы организации защиты энергетических объектов при воздействии агрессивной меняющейся среды	250
Соловей К. С., Кондратьев В.Г. Анализ методов защиты энергетических объектов при изменении внутренних и внешних воздействий	255
Иванова Т.Ю. Применение методов математического программирования при решении задач управления в чрезвычайных ситуациях	259
Акулов А.Ю., Иванов В.А., Аксенов А.В. Огнезащитное покрытие на основе минеральных термостойких заполнителей для металлических конструкций	263
Бараковских С.А., Иванов В.А., Плотников С.А. Исследование конструкций для предотвращения распространения пожара на объектах нефтегазового комплекса	266

Моделирование. Математические методы

Рудской А.И., Колбасников Н.Г., Зотов О.Г., Лукьянов А.А. Компьютерное моделирование испытаний на ударную вязкость: температурная зависимость ударной вязкости	271
Грязнов Н.А., Кириченко В.В., Кочкарев Д.А., Лопота А.В. Комплексирование сенсорных средств робототехнических платформ для решения задач перемещения платформы и объекта	278
Птицына Л. К., Птицын А. В. Определение динамических характеристик распределенных систем защиты информации	284
Розин Л.А., Лукашевич А.А. Численное решение контактных задач с трением при динамических воздействиях	288
Вольнов И.Н., Нагорный В.С. Моделирование процессов получения монодисперсных капель жидкостей в электрокаплеструйных технологиях	294
Солдатов К.В. Уточнение моделей потерь и напора в программах метода универсального моделирования	300
Фролов В.Я., Кархин В.А., Зверев С.Г., Иванов Д.В. Моделирование процесса испарения мелкодисперсного порошка в плазменной струе для получения наноматериалов	308
Фролов В.Я., Лопота А.В., Петров Г.К., Иванов Д.В. Разработка дугового плазмотрона постоянного тока для инициирования индуктивно связанной плазмы	319
Сикоев З.Х., Асфондиярова И.В. Современные методы исследования качества и потребительских свойств растительных масел	324
Марценюк М.А., Сивков В.Г., Складенко М.С. Экспериментальное изучение колебательного контура в современном практикуме	328
Колбасников Н.Г., Зотов О.Г., Лукьянов А.А. Математическое моделирование испытаний сталей падающим грузом и доли вязкой составляющей в изломе	335
Космач В.Ф. Квантовость орбит планет Солнечной системы	341

Вопросы образования

Баранова И.И. Тестирование в системе контроля обучения русскому языку как иностранному	345
Афанасьева И.Б. Формирование интеллектуальных умений в обучении	349
Тучкевич Е.И. Технология формирования ключевых профессиональных компетенций при подготовке магистров по направлению «Дизайн»	356

Комментарии

Корнеев В.Г. Комментарии к статье М.В. Ковтун, О.П. Родионовой и С.В. Лупуляка «Быстрый алгоритм решения некоторых контактных задач механики»	361
--	-----

Хроника событий

Брюханова И. А., Дементьева Е.В. Памяти Л.Н. Толстого	368
Сведения об авторах, контактные данные	371
Аннотации, ключевые слова	379

Contents

<i>The president and general designer PKK «Energy», a member-correspondent of the Russian Academy of Sciences V.A.Lopota is 60 years old</i>	9
Congress materials «Vocational training, science, innovations», devoted to the higher and vocational training	
Maximov A.S. <i>Higher school of St.-Petersburg: a course to modernization</i>	11
Okrepilov V.V. <i>Integration of the academic and high school science in innovative process</i>	20
Lobko V.N. <i>Problems of mathematical and natural-scientific preparation in engineering education. Historical experience – modern responses</i>	23
Power engineering and electrical engineering	
Petrenya Y.K., Saykova M. S. <i>Technological flaws influence to the strength and service life of power stations cylindrical elements at nonstationary temperature regimes</i>	27
Petin V.V., Batuhtin A.G., Kalugin A.V., Safronov P.G. <i>Modern technologies of using electric energy in centralized heat supply systems</i>	32
Andreev M.A., Vodovozov A.M. <i>Parameter identification of the asynchronous electric drive by transient process in power circuit.....</i>	38
Svetozarskaya S.V., Kubishkin L. I. <i>Parametric modeling of renewable energy objects</i>	42
Batuhtin A.G. <i>Peculiarities of modelling of using helioheating installations by consumers of heat energy within</i>	50
Grigoryev K.A. <i>Law of fuel crushing in mills: theory and experiment</i>	58
Shevchenko N.J. <i>Analysis of the projected mechanical loads on the wires section of over head power transmission lines to be reconstructed</i>	66
Shakirov M.A., Andruchuk V.V., Wang Sinan. <i>Truht of the 2t-shaped equivalent circuit of power transformer</i>	72
Shakirov M.A., Wang Sinan. <i>Imroved 2t-shaped equivalent circuit of transformer</i>	79
Sergeev V.V., Aleshina A.S. <i>Basis for using municipal solid wastes as a fuel</i>	91
Usynin J.S., Ostrouhov V.V. <i>Application of the individual electric drive in feeders of camps cold proskating rinks of pipes</i>	96
Andreev K.D., Polishchuk V.G., Rassokhin V.A., Sokolov N.P. <i>Research of hydraulic characteristics and m heat emission in direct slot-hole channels</i>	100
Mechanical engineering	
Nusratullin E.M. <i>Controlling stress and strain state at the point of compressor blade crossing to its shank by reinforcing high module fibres</i>	107
Rusinov R.V., Dobretsov R.Yu. <i>The comparative analysis of the overall performance of diesel engines with turbo-supercharging and mechanical pressurization</i>	111
Borysevitch A.V., Gedko P.J., Smirnov A.B. <i>Microrobot on the basis of spherical joint with piezo drives</i>	116

Ivanov V.J. <i>Influence of the final sizes of the hinge on the decision of the contact problem</i>	124
Tsvetkova G.V., Skotnikova M.A., Belov Y.M., Krylov N.A., Ivanov E.K. <i>Structural and phase condition facing materials intended for workers blades amalgamators</i>	129
Shlepetinskiy A.J., Manzhula K.P. <i>Stress intensity factors for a crack from a lack of fusion in a fillet weld of a cruciform joint</i>	137
Levina G.A., Drokin V.V. <i>Loading characteristics of petal radial bearings of turbomachines</i>	146
Galerkin Y.B., Soldatova K.V., Drozdov A.A. <i>Specification of algorithm of calculation of parameters of the stream in the centrifugal compressor step</i>	150
Gryaznov N.A., Kirichenko V.V., Kochkarev D.A. <i>Nanosatellite-based distributed networks for monitoring of near-earth space parameters</i>	157

Metallurgy

Rudskoj A.I., Kokorin V.N. <i>Introduction of technology of pressing of disperse metallic materials on the basis of iron with use of liquid phases</i>	163
Nosov V.V., Zhil'cov A.P., Lavrin V.G. <i>Nondestructive control quality of stock material for production hot-rolled steel by Acoustic Emission method</i>	170

Science of materials

Turichin G.A., Tsibulskii I.A., Kuznetsov M.V., Somonov V.V., Valdaitseva E.A. <i>Research of porosity formation at laser and laser-arc welding of aluminum alloys</i>	175
Turichin G.A., Tsibulskii I.A., Kuznetsov M.V., Somonov V.V. <i>Hybrid laser-arc welding of the thick-walled metals</i>	181
Frolov V.Y., Smirnova E.A., Yushin B.A. <i>Application of accelerated induction heating for improvement of performance properties of plasma coatings</i>	187
Radkevich M.M., Novikov A.I., Fomin D.U. <i>Steel structure formation under the conditions of programmed mechanical thermal processing</i>	192
Ivankov S.A., Bashkarev A.J. <i>About the fatigue life and strength of composites</i>	196
Sokolov S.A., Grachev A.A. <i>Buckling of a plate with a rigidity edge</i>	200

Nature management

Arefiev N.V., Badenko V.L., Latyshev N.K. <i>Geocological approaches to design of information-analytical systems for hydromeliorative building and development of nature</i>	205
Gorbovskey A.D., Bachmetova K.A., Matinyan N.N. <i>Ecological state of the soils of the sanctuary lammin-suo</i>	211
Markelova E.A. <i>Experimental study of oil spills' biodestruction in marine environment</i>	216
Strelets K.I. <i>About dust particles characteristics for estimation cyclones</i>	222

Formation

Romanchenko O.V. <i>Geodetic maintenance of building project</i>	227
Tedelev T.R., Rutkovsky A.L. <i>To the question of expedient redistribution of contact pressure</i>	232

Safety in emergency situations

Syrov A.A., Hramov A.B. <i>Criteria of the estimation of adverse consequences of radiating failures</i>	237
Gumenyuk V.I., Hramov A.B. <i>Problems of the account of the fulfilled nuclear fuel (оям) transport installations</i>	241

Tumanov A.J., Domakov V.V., Kondratyev. V.G. Dangerous technogenic factors of influence and the requirement shown to protection of power economic objects	245
Atoyan G.L., Kondratyev V.G. Invariance of principles of securing energy objects of national economy from influence of the aggressive changing environment	250
Solovej K.S., Kondratyev V.G. The analysis of methods of protection of power economic objects at change of internal and external influences	255
Ivanova T.Y. Application of problems of mathematical programming at the decision of problems of management in emergency situations	259
Akulov A.Y., Ivanov V.A., Aksyonov A.V. Fireproof covering on the basis of mineral heat-resistant fillers for metal designs	263
Barakovskih S.A., Ivanov V.A., Plotnikov S.A. Development of device for prevention of fire spread on oil and gaz industry	266

Modelling. Mathematical methods

Rudskoy A.I., Kolbasnikov N.G., Zotov O.G., Lookianov A.A. Computer simulation of impact strength test. Temperature dependence of impact strength	271
Gryaznov N.A., Kirichenko V.V., Kochkarev D.A., Lopota A.V. Complexing sensor means of robotic platforms for locomotion and manipulation	278
Ptitsyna L.K., Ptitsyn A.V. Definition of dynamic characteristics of the distributed systems of protection of the information	284
Rozin L.A., Lukashevich A.A. The numerical decision of contact problems with friction under the dynamic loads	288
Volnov I.N., Nagorniy V.S. Modeling of the processes of receiving monodisperse streams of working liquids jets in electro droplet-jet technologies	294
Soldatova K.V. Universal modelind method loss and work input models verification on results of industrial compressors test	300
Frolov V.Ya., Karchin V.A., Zverev S.G., Ivanov D.V. Simulation of evaporation fine powder in the plasma jet for nanomaterials	308
Frolov V.Ya., Lopota A.V., Petrov G.K., Ivanov D.V. Development of dc arc plasma torch for inductively coupled plasma initialization	319
Sikoev Z.H., Asfondijarova I.V. Modern methods of research of quality and consumer properties of vegetable oils	324
Martsenyuk M.A., Sivkov V.G., Sklyarenko M.S. Experimental study of oscillatory circuit in modern physics laboratory	328
Kolbasnikov N.G., Zotov O.G., Lukyanov A.A. Mathematical modeling of drop weight tear testing and fracture toughness of steels	335
Kosmach V.F. The quantum orbits of planets of solar system	341

Education issues

Baranova I.I. Testing in the system of control in russian as a foreign language	345
Afanas'eva I.B. Formation of intellectual skills in training	349
Tuchkevich E.I. Technology of forming core professional competencies of masters educated in professional program «design»	356

Commentary

Korneev V.G. Commentaries on the paper by M.V. Kovtun, O.P. Rodionova and S.V. Lupuliak «fast algorithm of solution of some contact problems in mechanics»	361
---	-----

Chronicle of events

Brjuhanova I.A., Dementyeva E.V. To the memory L.N.Tolstoy	368
About the authors, contact information	371
Abstracts, key words	379

**ПРЕЗИДЕНТУ И ГЕНЕРАЛЬНОМУ КОНСТРУКТОРУ РКК «ЭНЕРГИЯ»
ЧЛЕНУ-КОРРЕСПОНДЕНТУ РАН
ВИТАЛИЮ АЛЕКСАНДРОВИЧУ ЛОПОТЕ — 60 ЛЕТ**



С момента поступления в ЛПИ им. М.И. Калинина в 1972 году вся жизнь В.А. Лопоты была посвящена одной цели — науке. Обучаясь в аспирантуре, он заинтересовался проблемами лазерных технологий, конкретно — лазерной сваркой. Обладая хорошей фундаментальной подготовкой, инициативой и энергией, он достаточно быстро прошел путь от младшего сотрудника до профессора, создав в институте научную школу по лазерным технологиям.

В 1991 году В.А. Лопота возглавил ЦНИИ Робототехники и технической кибернетики. В эти годы была существенно расширена тематика работ, проводимых в институте. Кроме основной тематики по робототехнике и управлению работой двигателей мягкой посадки пилотируемых космических кораблей «Союз» появились новые направления: это высокоскоростные технологии обработки и передачи ин-

формации для управления сложными системами и защиты информационных ресурсов в глобальных и локальных сетях; робототехника для экстремальных условий; разработка концепции роботизации Вооруженных сил страны. Дальнейшее развитие института происходило под непосредственным руководством В.А. Лопоты. В сложившейся системе кооперации ЦНИИ РТК совместно с РКК «Энергия» и предприятиями ракетно-космической и судостроительной промышленности осуществлен международный проект «Морской старт», была разработана концепция изготовления роботов-манипуляторов для сборки и эксплуатации тяжелых орбитальных платформ и космических станций.

С лета 2007 года В.А. Лопота — руководитель РКК «Энергия» имени С.П. Королева, головной организации страны по созданию и эксплуатации пилотируемых ракетно-космических комплексов и систем и средств выведения их на орбиту. Благодаря организаторским способностям и высокому уровню профессионализма В.А. Лопоты, РКК «Энергия» выполняет обязательства России по программе Международной космической станции. В РКК «Энергия» широким фронтом ведутся перспективные разработки по автоматическим космическим системам для российских и зарубежных заказчиков на базе универсальной космической платформы.

При всей загруженности в РКК «Энергия», В.А. Лопота поддерживает тесную связь с СПбГПУ: будучи заведующим кафедрой сварки и лазерных технологий и деканом факультета при ГНУ ЦНИИ РТК, он является научным руководителем — генеральным конструктором ГНУ ЦНИИ РТК.

В Российской академии наук Виталий Александрович работает в ряде научных советов и является членом Президиума Санкт-Петербургского научного центра РАН.

*Редакционный Совет журнала поздравляет своего коллегу
и желает Виталию Александровичу крепкого здоровья,
творческих достижений и счастья!*



МАТЕРИАЛЫ КОНГРЕССА «ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ, НАУКА, ИННОВАЦИИ»

А.С. Максимов

ВЫСШАЯ ШКОЛА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА: КУРС НА МОДЕРНИЗАЦИЮ

Подводя итоги развития высшей школы Санкт-Петербурга за последние годы и определяя перспективы ее развития как одной из системообразующих отраслей экономики города, необходимо отметить значение высшего профессионального образования на современном этапе социально-экономического развития страны и региона.

На новый уровень задач высшую школу Санкт-Петербурга как составную часть российской системы профессионального образования выводят результаты совместного заседания Госсовета Российской Федерации и Комиссии при Президенте Российской Федерации по модернизации и технологическому развитию экономики России, прошедшего 31 августа 2010 года в Кремле.

Выбор инновационной стратегии развития России, направленность на модернизацию и технологическое развитие экономики по инновационным рельсам обуславливают необходимость выработки и реализации адекватной политики в важнейшей области — обеспечении проводимых преобразований профессиональными кадрами. Модернизация экономики невозможна без модернизации профессионального образования и его ведущего звена — высшего образования.

Реализация стратегии модернизации системы высшего профессионального образования Санкт-Петербурга включает несколько направлений:

1. Институциональные изменения высшей школы в области формирования сети высших учебных заведений и структуры подготовки специалистов с высшим профессиональным образованием, соответствующих потребностям современной экономики.

2. Обеспечение инновационного характера высшего профессионального образования на основе внедрения современных образовательных технологий и воплощения новых подходов к организации образовательного процесса.

3. Инфраструктурные изменения высшей школы, основанные на развитии ее кадрового потенциала, материально-технической базы образовательной деятельности и социальной инфраструктуры.

4. Инвестиционный подход к развитию высшей школы, предполагающий концентрацию ресурсов на решении наиболее важных задач, определяющих возможности и перспективы всей системы профессионального образования.

5. Информационное обеспечение происходящих в высшей школе процессов, расширение возможностей выбора профессии, специальности, образовательного учреждения и, в конечном итоге, сферы дальнейшей деятельности на основе объективной информации о качестве предоставляемых образовательных услуг.

Высшая школа Санкт-Петербурга играет одну из важнейших ролей в его экономике и социальной инфраструктуре. Более 530 тысяч жителей города работают и обучаются в системе высшего профессионального образования. В настоящее время система высшего профессионального образования Санкт-Петербурга представлена высшими учебными заведениями разных форм собственности и разного ведомственного подчинения, в том числе 52 государственными и 44 негосударственными, а также научными организациями, реализующими образовательные программы послевузовского профессионального образования.

Высшие учебные заведения нашего города решают задачи подготовки кадров для отраслей экономики, социальной и культурной сфер Санкт-Петербурга, а также общероссийские государственные задачи кадрового обеспечения отраслей экономики практически всех регионов России.

Система профессионального образования Санкт-Петербурга — крупнейшая отрасль социальной сферы, обеспечивающая обучение и со-

циализацию более 470 тысяч студентов, аспирантов, докторантов, и одна из крупнейших отраслей экономики города (65 тысяч занятых, общий объем финансирования — 44 млрд рублей в год). Численность студентов высших учебных заведений выросла с 429 тысяч в 2005/2006 учебном году до 454 тысяч в 2009/2010-м.

За этот же период произошло увеличение численности профессорско-преподавательского состава (ППС) вузов с 28,7 до 30,1 тыс. чел. В составе ППС — более 5 тысяч докторов наук (16 % ППС) и более 15 тысяч кандидатов наук (51 % ППС).

Абсолютное большинство государственных высших учебных Санкт-Петербурга имеют федеральное подчинение, находясь в ведении 13 федеральных органов государственной власти и двух государственных академий (Российской академии наук и Российской академии художеств). По одному вузу находится в ведении субъектов Российской Федерации — Санкт-Петербурга и Ленинградской области. В последние годы налажено тесное взаимодействие с Министерством образования и науки Российской Федерации и Федеральной службой по надзору в сфере образования и науки, согласованность действий с которыми позволяет находить оптимальные решения по многим проблемам (оптимизация сети подведомственных учебных заведений, согласование контрольных цифр приема

на первый курс и в магистратуру, проведение лицензирования и госаккредитации вузов и их филиалов на территории Санкт-Петербурга, строительство объектов межвузовской социальной инфраструктуры и др.).

Важной особенностью прошедшего периода стал полный перевод Единого государственного экзамена (ЕГЭ) в штатный режим в 2009 году. Прием во все образовательные учреждения высшего профессионального образования Санкт-Петербурга, имеющие государственную аккредитацию, осуществлялся по результатам ЕГЭ. В связи со значительными изменениями порядка приема в указанные образовательные учреждения серьезно возросла нагрузка на приемные комиссии за счет резкого роста числа поданных заявлений. Значительно вырос прием в магистратуру.

Высшие учебные заведения Санкт-Петербурга в 2010 году, несмотря на резкое снижение выпуска из общеобразовательных учреждений в последние годы в связи со сложной демографической ситуацией в Санкт-Петербурге (рис. 1), смогли обеспечить план приема на бюджетные места и завершили прием на места с полным возмещением затрат практически на уровне 2009 года. Более того, по сравнению с прошлыми годами конкурс в вузы даже увеличился — с 3,61 заявлений на место в 2008 году до 9,4 в 2010-м. Все это наряду с ростом доли иногородних студентов, принятых на первый курс (с 47 % в 2008

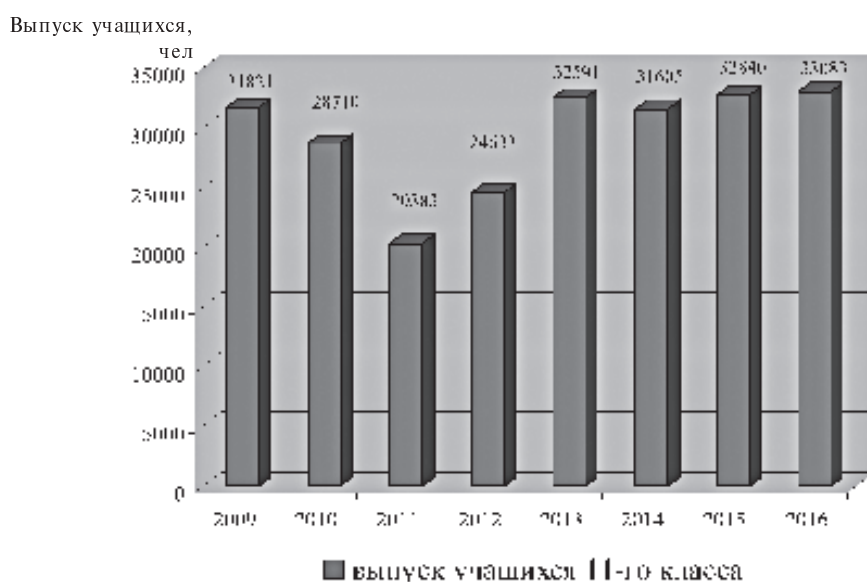


Рис. 1. Демографические показатели выпуска учащихся общеобразовательных школ Санкт-Петербурга

году до 59 % в 2010 году), наглядно подтверждает статус Санкт-Петербурга как общероссийского центра профессионального образования.

Важные институциональные изменения высшей школы Санкт-Петербурга, обеспечивающие повышение эффективности использования ее потенциала, связаны с формированием в последние годы новой структуры системы высшего профессионального образования.

Одно из основных направлений оптимизации системы высшего профессионального образования Санкт-Петербурга и формирования ее новой структуры — реализация совместно с Министерством образования и науки Российской Федерации, другими федеральными органами государственной власти, имеющими в ведении образовательные учреждения, политики вертикальной интеграции образовательных учреждений профессионального образования разного уровня. В ее рамках формируются вертикально интегрированные университетские комплексы «вуз — колледж», включающие подразделения, которые реализуют программы среднего профессионального образования. К 2010/2011 учебному году создано 26 вертикально интегрированных (университетских) комплексов.

Такая интеграция образовательных учреждений позволяет не только более эффективно использовать имеющуюся материально-техническую базу, учебно-методический и научно-педагогический потенциал, сократить управленческие расходы, но и поднять качество подготовки специалистов за счет привлечения в процесс обучения по программам среднего профессионального образования преподавателей вузов и использования вузовского учебно-лабораторного оборудования.

Другой важный элемент формирующейся структуры — инновационные университеты. Решение задачи перехода на иное качество подготовки специалиста — одной из важнейших для системы высшего профессионального образования — в значительной степени связано с использованием инновационных образовательных программ. В этом отношении трудно переоценить значение приоритетного национального проекта «Образование». Именно инновационные университеты, разработавшие и реализовавшие в его рамках свои образовательные программы, становятся сегодня лидерами профессионального образования, в первую очередь — с точки зрения качества подготовки специалистов, и наряду с национальными исследовательскими универ-

ситетами определяют направление развития всей системы в качестве ее «точек роста».

Участие высших учебных заведений Санкт-Петербурга, ставших победителями конкурсов, проводившихся Министерством образования и науки Российской Федерации, — Санкт-Петербургского государственного университета, Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», Санкт-Петербургского государственного горного института им. Г.В. Плеханова, Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики — в реализации приоритетного национального проекта «Образование» позволило в течение 2006–2010 годов привлечь в городскую систему профессионального образования финансирование из бюджетов Российской Федерации и Санкт-Петербурга, а также из внебюджетных источников в общем объеме более 9,8 млрд рублей, в том числе на реализацию инновационных образовательных программ шести инновационных университетов — более 5 млрд рублей, на реализацию проекта создания Высшей школы менеджмента Санкт-Петербургского государственного университета — 4,8 млрд рублей.

По результатам конкурсного отбора, проведенного в 2009 году Министерством образования и науки Российской Федерации, четырем вузам Санкт-Петербурга присвоена категория «национальный исследовательский университет». Это Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова (технический университет), Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербургский академический университет — Научно-образовательный центр нанотехнологий РАН. Такой статус устанавливается сроком на 5 лет и позволяет каждому из этих вузов привлекать дополнительное финансирование из федерального бюджета в объеме до 1,8 млрд рублей.

В соответствии с федеральным законом от 10.11.2009 № 259-ФЗ «О Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова и Санкт-Петербургском государственном универ-

ственному университету присвоен особый статус и предоставлены специальные полномочия в области формирования и реализации образовательных программ.

Формирующаяся структура системы высшего профессионального образования Санкт-Петербурга следующая:

1. Университетские комплексы.
2. Вузы Санкт-Петербурга, реализовавшие инновационные образовательные программы в рамках приоритетного национального проекта «Образование».
3. Национальные исследовательские университеты.
4. Высшее учебное заведение с особым статусом — Санкт-Петербургский государственный университет.
5. Высшие учебные заведения Санкт-Петербурга.

Говоря о формирующейся структуре системы высшего профессионального образования Санкт-Петербурга, необходимо упомянуть и о предприятиях, созданных в высших учебных заведениях и академических институтах города для практического применения (внедрения) результатов интеллектуальной деятельности в соответствии с федеральным законом от 2 августа 2009 года № 217-ФЗ. В целях поддержки таких предприятий Правительство Санкт-Петербурга выделило в 2010 году бюджетные ассигнования в объеме 19,6 млн рублей на выплату им субсидий. Подобные инвестиции в сектор, обеспечивающий коммерциализацию научных результатов, непосредственно способствуют интеграции вузовской и академической науки с промышленностью и дают им серьезный импульс для развития. Победителями конкурса, проведенного в текущем году, признаны 34 предприятия, в том числе 24 — при вузах Санкт-Петербурга, которым предоставляются субсидии по 400 тыс. рублей на общую сумму 9,6 млн рублей.

Реализация инновационных образовательных программ не только обеспечивает рост собственного научно-образовательного потенциала соответствующих образовательных учреждений, но и формирует благоприятные условия для развития системы профессионального образования в целом.

Наглядное подтверждение развивающейся в Санкт-Петербурге кооперации высшей школы и реального сектора экономики — результаты участия петербургских вузов и промышлен-

ных предприятий в конкурсе совместных проектов по организации новых высокотехнологичных производств, проведенном Минобрнауки России в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года № 218. Победителями двух этапов конкурса стали сразу 16 проектов с участием вузов Санкт-Петербурга, что составило более 14 % общего числа победителей по России.

В подобном конкурсе по отбору программ развития инновационной инфраструктуры, включая поддержку малого инновационного предпринимательства, федеральных образовательных учреждений высшего профессионального образования, проведенном в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года № 219, победителями признаны программы четырех высших учебных заведений Санкт-Петербурга.

Победителями еще одного федерального конкурса, проведенного в 2010 году в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 09.04.2010 № 220 «О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования», признаны 6 ученых из четырех вузов Санкт-Петербурга. На проведение научных исследований под их руководством выделяются гранты из федерального бюджета в размере 150 млн рублей каждый.

Это можно считать хорошим примером одновременно инновационного и инвестиционного подхода к вопросам модернизации системы высшего профессионального образования.

Вместе с тем отдельные инвестиции в наиболее значимые сектора и сегменты системы, определяющие инновационный характер развития, не обеспечат успешность ее модернизации без качественных изменений всей инфраструктуры высшей школы: качественного переоснащения материально-технической базы, в том числе социальной инфраструктуры, развития кадрового потенциала.

Развитие материально-технической базы высшей школы Санкт-Петербурга включает несколько направлений: содействие реализации инвестиционных проектов федеральных образовательных учреждений, развитие социальной инфраструктуры системы профессионального образования, в том числе реконструкция и новое строительство вузовских и межвузовских объектов, в частности за счет средств бюджета Санкт-Петербурга.

Понимая важность этой задачи, Правительство Санкт-Петербурга даже в сложный период преодоления последствий мирового финансового кризиса изыскало немалые средства для ее решения. Так, в течение 2008–2010 годов в соответствии с постановлением Правительства Санкт-Петербурга от 11.11.2008 № 1405 «О бюджетных инвестициях в строительство объектов межвузовской социальной инфраструктуры, планируемых к проектированию и строительству в 2009–2010 годах» за счет средств бюджета города в Московском районе по адресу Новоизмайловский пр., 16 осуществляется строительство общежития на 500 мест для студентов и аспирантов, обучающихся по высокотехнологичным специальностям. Общежитие вводится в конце 2010 года и позволит привлечь наиболее подготовленную, профессионально ориентированную молодежь со всей России в вузы Санкт-Петербурга, осуществляющие подготовку специалистов по прорывным направлениям для ведущих отраслей, обеспечивающих модернизацию и технологическое развитие экономики.

Как примеры развития вузовской и межвузовской социальной инфраструктуры можно привести строительство Межвузовского спортивного комплекса на территории Межвузовского студенческого городка в Санкт-Петербурге (первая очередь вводится в конце ноября 2010 года) и строительство бассейна Санкт-Петербургским государственным горным институтом (вводится в конце декабря 2010 года).

Для Санкт-Петербурга вопрос развития вузовской и межвузовской социальной инфраструктуры, в первую очередь строительства и реконструкции студенческих общежитий, имеет особое значение. Вузы нашего города обеспечивают подготовку специалистов с высшим профессиональным образованием не только для Санкт-Петербурга и Северо-Западного федерального округа, но и для других регионов России. Доля студентов из других регионов России, принятых на первый курс, увеличилась с 30 % в 1999 году до 52 % в 2009 году и 59 % в 2010-м. Соответственно резко обострилась проблема дефицита мест в общежитиях. Для многих вузов Санкт-Петербурга она стала серьезным фактором, сдерживающим возможности приема, отбора студентов. Кроме того, значительная часть жилого фонда студенческих общежитий физически и морально устарела и требует срочного ремонта.

Ожидания улучшения ситуации в этом отношении связаны с возобновлением Минобрнауки России реализации проекта строительства новых жилых корпусов в Межвузовском студенческом городке. Однако к указанному министерству относится лишь половина петербургских вузов, что порождает целый ряд юридических и финансовых вопросов при заселении общежитий МСГ студентами вузов иной ведомственной принадлежности.

Другое важное направление развития инфраструктуры высшей школы Санкт-Петербурга — укрепление ее кадрового потенциала, развитие системы социальной защиты преподавателей и студентов.

Один из наиболее серьезных вопросов — обеспечение воспроизводства кадров системы высшего профессионального образования и науки Санкт-Петербурга в условиях быстрого старения профессорско-преподавательского состава и научного персонала и сложной демографической ситуации. На решение этой задачи направлено развитие сформированной в Санкт-Петербурге в последние годы уникальной системы отбора и поддержки профессионально ориентированной молодежи, которая включает различные формы работы со всеми ее категориями от учащихся старших классов до молодых ученых:

- проведение предметных олимпиад школьников и студентов, творческих конкурсов и др.;

- грантовую поддержку студентов (размер каждого гранта 20 тыс. рублей), аспирантов (50 тыс. рублей), молодых ученых (100 тыс. рублей), молодых кандидатов (150 тыс. рублей), выплату премий Правительства Санкт-Петербурга в области научно-педагогической деятельности молодым научно-педагогическим работникам (30–63 тыс. рублей);

- стипендии Правительства Санкт-Петербурга лучшим студентам вузов (220 стипендий в размере 1500 рублей в месяц с 01.01. 2009) и специальные стипендии в области информационных технологий (70 стипендий в размере 4000 рублей в месяц), премии студентам за выполнение дипломных проектов по заказу исполнительных органов государственной власти Санкт-Петербурга (8000 рублей) и др.;

- конкурс «Студент года» в системе высшего профессионального образования Санкт-Петербурга;

- создание и содействие деятельности Совета молодых ученых и специалистов и Студенческого совета Санкт-Петербурга.

Несмотря на трудности, связанные с преодолением последствий мирового финансового кризиса, финансирование указанных программ из бюджета города в последние годы при поддержке Губернатора Санкт-Петербурга В.И. Матвиенко не только не сократилось, но даже выросло. Показатели грантовой поддержки студентов, аспирантов, преподавателей и ученых вузов из бюджета Санкт-Петербурга за прошедшее пятилетие представлены в таблице.

Эту же задачу решает учреждение постановлением Правительства Санкт-Петербурга от 12.10.2009 № 1110 специальных стипендий для лучших студентов первого и второго курса из числа победителей международных, всероссийских и ряда зарубежных олимпиад по программированию, принятых на обучение в вузы Санкт-Петербурга по специальностям в области информационных технологий (постановлением предусмотрена выплата начиная с 2010/2011 учебного года 70 стипендий по 4 тыс. рублей) для студентов. Из 35 первокурсников-победителей недавно проведенного конкурса на получение указанных стипендий 27 человек приехали в Санкт-Петербург из других регионов России и ближнего зарубежья, а это значит, что механизм привлечения лучших работает.

На заседании Правительства Санкт-Петербурга 2 ноября 2010 года принято решение об учреждении подобных стипендий для победителей олимпиад по физике и по математике.

Неоценимую роль в системе морального и материального поощрения научно-педагогического сообщества города играют премии Правительства Санкт-Петербурга за выдающиеся достижения в области высшего и среднего профессионального образования и за выдающиеся научные результаты в области науки и техники. Двадцать таких премий по 100 тыс. рублей учреждены постановлением Правительства Санкт-Петербурга от 23.05.2006 № 609 и вручаются в День рождения Санкт-Петербурга — День города с 2007 года. Губернатор В.И. Матвиенко поддержала ходатайство Санкт-Петербургского научного центра РАН и Совета ректоров вузов нашего города об увеличении с 2011 года размера премий до 300 тыс. рублей.

В результате проводимой в данном направлении работы удалось стабилизировать приток молодых научно-педагогических кадров в вузы. Более того, с 2008-го по 2010 год доля лиц в возрасте до 39 лет среди профессорско-преподавательского состава высших учебных заведений Санкт-Петербурга даже выросла (рис. 2).

В последние годы приняты дополнительные меры по обеспечению социальной защищенности различных категорий работников, студентов и аспирантов вузов за счет средств бюджета Санкт-Петербурга, в том числе льготный проезд на городском пассажирском и на пригородном железнодорожном транспорте, ежемесячные выплаты студенческим семьям, городские про-

**Грантовая поддержка студентов, аспирантов, преподавателей и ученых вузов
из бюджета Санкт-Петербурга в 2006–2010 годах**

Название конкурса	Количество заявок	Количество победителей	Общий объем финансирования, млн руб.
Конкурс грантов для студентов, аспирантов вузов и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга	5848	1823	47,6
Конкурсный отбор для предоставления субсидий молодым ученым, молодым кандидатам наук вузов и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга	1644	787	90,8
Конкурс грантов для молодых научно-педагогических работников вузов и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга	597	232	9,8
Конкурс грантов Санкт-Петербурга в сфере научной и научно-технической деятельности	1349	299	35,9
ИТОГО	9438	3141	184,1

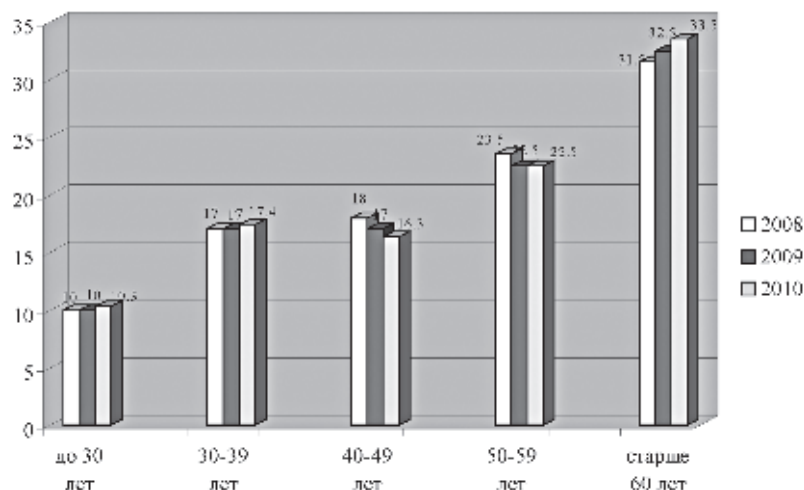


Рис. 2. Возрастная структура профессорско-преподавательского состава вузов Санкт-Петербурга, %

граммы улучшения жилищных условий работникам бюджетной сферы и молодежи. Только в 2010 году объем выпадающих доходов в связи с реализацией предоставленных студентам льгот на проезд в городском транспорте превысит 1,4 млрд рублей, в 2011 году предполагается выделить 1,6 млрд рублей).

Законом Санкт-Петербурга от 02.07.2008 № 390-63 «О дополнительной мере социальной поддержки студенческих семей в Санкт-Петербурге» студенческим семьям, имеющим детей, установлена ежемесячная социальная выплата в размере 2 000 рублей с ежегодной индексацией. В Санкт-Петербурге в настоящее время насчитывается 256 студенческих семей с детьми, на которых распространяется действие закона (общий объем выплат из бюджета Санкт-Петербурга — более 6 млн рублей в год).

Решение всех этих вопросов требует серьезных затрат из городского бюджета, но они вполне оправданы, если принять во внимание важность подобных вложений в «человеческий капитал» и эффективность таких инвестиций с точки зрения достигаемого результата.

В целях преодоления последствий мирового финансового кризиса и смягчения его негативного влияния на состояние регионального рынка труда в 2010 году в Санкт-Петербурге проведена большая работа, направленная на решение еще одной важной социальной задачи — обеспечение трудоустройства выпускников образовательных учреждений высшего профессионального образования.

В соответствии с решением Межведомственного координационного совета по кадровому обеспечению отраслей экономики Санкт-Петербурга при Правительстве города под председательством вице-губернатора А.Ю. Маниловой от 13.02.2009 создана рабочая группы для координации работы по обеспечению устойчивости петербургского регионального рынка труда с участием представителей профильных исполнительных органов государственной власти, советов ректоров вузов и директоров средних специальных учебных заведений нашего города, Союза промышленников и предпринимателей Санкт-Петербурга. Рабочей группой разработан и реализован Комплексный план действий по обеспечению переподготовки высвобождающихся работников предприятий и организаций и трудоустройства выпускников образовательных учреждений профессионального образования в Санкт-Петербурге в 2009 году, утвержденный губернатором 16.03.2009.

В течение 2009—2010 годов в Санкт-Петербурге проводится мониторинг трудоустройства выпускников вузов и других образовательных учреждений профессионального образования. По данным мониторинга абсолютное большинство выпускников вузов трудоустроены. Численность выпускников очной формы обучения 2009 года составила 47,2 тыс. человек, в 2010 году — 50,3 тыс. человек. Из них трудоустроились после окончания вуза в 2009—2010 годах 69 %, продолжили обучение (в магистратуре, аспирантуре) 18 %, призваны в Вооруженные силы РФ —

9 %, не трудоустроились — менее 4 %. В 2009 году обратились в службы занятости 745 выпускников вузов, из них поставлены на учет в качестве безработных 486 человек.

Кроме того, в вузах Санкт-Петербурга созданы и расширяют деятельность структурные подразделения, занимающихся содействием трудоустройству выпускников, организованы стажировки и производственные практики студентов (более 16200 студентов прошли производственную практику/стажировку с перспективой трудоустройства), организовано обучение студентов по дополнительным образовательным программам (116 курсов, более 7300 обученных), вузами заключены договоры о сотрудничестве с промышленными предприятиями, организациями, районными службами занятости (более 3500 договоров вузов с кадровыми службами предприятий и организаций).

Важный результат развития высшей школы Санкт-Петербурга и одновременно индикатор состояния — повышение ее конкурентоспособности на общероссийском и международном рынке образовательных услуг, развитие кооперации с российскими и зарубежными учебными заведениями и международными организациями, других форм межрегиональных и международных связей. С целью развития и укрепления имиджа Санкт-Петербурга на международном уровне как крупнейшего научно-образовательного центра, города науки и высоких технологий в нашем городе ежегодно проводятся крупные международные мероприятия. Так, на протяжении ряда лет при поддержке Правительства города проводится Санкт-Петербургский научный форум — встреча нобелевских лауреатов с участием представителей научной элиты петербургских, российских и зарубежных университетов и научных институтов, на которых обсуждаются актуальные проблемы развития науки и высшего образования. В текущем году в таком форуме, прошедшем с 18 по 22 октября под девизом «Наука и общество. Экономика и социология в XXI веке», приняли участие четыре нобелевских лауреата из разных стран мира: Ж.И. Алферов (Россия), Р. Корберг (США), Дж. Мирлис (Великобритания), Э. Маскин (США).

Стало традиционным проведение за счет средств городского бюджета Санкт-Петербургского конгресса «Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке». Вопросы

подготовки специалистов с высшим профессиональным образованием поднимаются на таких крупных мероприятиях, как Петербургский международный инновационный форум. В рамках такого форума, прошедшего в 2009 году, проведена конференция «Кадры для инновационной экономики» и ряд других мероприятий. В этом году в рамках подобного форума 30 сентября 2010 прошло пленарное заседание 14-го Международного промышленного форума «Российский промышленник» на тему: «Инновационный прорыв и бизнес. Существует ли инновационный «конвейер» в Санкт-Петербурге?».

Кроме того, город финансирует проведение комплекса мероприятий по содействию продвижению образовательных услуг Санкт-Петербурга на международный рынок. Так, в целях расширения и развития научно-образовательных связей учебных заведений Санкт-Петербурга, увеличения притока иностранных студентов на обучение в вузы города обеспечено представление высшей школы Санкт-Петербурга на ряде крупных международных образовательных выставок в Китае, Норвегии, Иордании, Швейцарии, Латвии, Марокко, Казахстане и др. В настоящее время у нас в городе учится более 14 тысяч иностранных граждан — студентов, аспирантов, докторантов, стажеров из более чем 100 стран ближнего и дальнего зарубежья.

Учитывая многоплановость, комплексность и сложность задачи развития высшего образования и системы профессионального образования в целом, в Санкт-Петербурге используются программно-целевые методы ее решения. Большое внимание этим вопросам уделяется в постановлениях Правительства Санкт-Петербурга от 28. 03. 2006 № 304 «Об основных мероприятиях по развитию высшей школы Санкт-Петербурга на 2007 — 2010 годы», а также от 19. 06. 2007 № 684 «Об основных мероприятиях по развитию научной деятельности в Санкт-Петербурге на 2008—2011 годы», в котором также затрагиваются вопросы высшего профессионального образования.

Анализу результатов развития высшей школы Санкт-Петербурга в течение последних лет и его задачам и перспективам в ближайшее пятилетие в контексте модернизации российского образования было посвящено заседание Правительства Санкт-Петербурга, состоявшееся 02 ноября 2011 г. с участием руководителя

Федеральной службы по надзору в сфере образования и науки Л.Н. Глебовой и представителей Совета ректоров вузов Санкт-Петербурга. Правительством города был утвержден План мероприятий по развитию высшей школы Санкт-Петербурга на 2011–2015 годы, подготовленный с учетом результатов обсуждения вопроса о перспективах развития профессионального образования на совместном заседании Государственного совета Российской Федерации и Комиссии по модернизации и технологическому развитию экономики России при Президенте 31 августа 2010 года.

При разработке проекта в его основу было положено понимание того, что в 2010 году в Российской Федерации начался новый важный этап модернизации системы профессионального образования.

Разделы Плана основных мероприятий по развитию высшей школы Санкт-Петербурга на 2011–2015 годы направлены на решение важнейших задач, стоящих перед этой сферой. План включает пять разделов.

Мероприятия раздела 1 «Развитие системы поддержки и отбора талантливой профессионально ориентированной молодежи, повышение качества и доступности системы высшего профессионального образования Санкт-Петербурга» имеют целью изменение структуры выбора профессионально ориентированной молодежью специальностей и направлений подготовки в пользу высокотехнологичных отраслей реального сектора экономики, сферы услуг, научной сферы, а также формирования условий отбора для поступления и обучения в высших учебных заведениях нашего города наиболее подготовленной молодежи Санкт-Петербурга и других регионов России.

Мероприятия раздела 2 «Развитие системы высшего профессионального образования Санкт-Петербурга» решают задачи модернизации системы высшего профессионального образования, включая формирование горизонтально и вертикально интегрированных университетских комплексов, снижение конкуренции между учебными заведениями высшего профессионального образования в Санкт-Петербурге и повышение их конкурентоспособности на общероссийском и мировом рынках образовательных услуг.

Мероприятия раздела 3 направлены на развитие материально-технической базы и социальной сферы системы высшего профессионально-

го образования Санкт-Петербурга путем расширения сети и модернизации учебных корпусов, общежитий и других социально-культурных объектов высших учебных заведений нашего города за счет бюджетов Российской Федерации и Санкт-Петербурга, а также внебюджетных источников.

Мероприятия раздела 4 «Взаимодействие системы высшего профессионального образования Санкт-Петербурга и рынка труда» решают задачи обеспечения соответствия структуры и качества подготовки специалистов потребностям отраслей экономики, социальной и культурной сфер региона в кадрах, повышения эффективности использования материально-технического, кадрового и финансового потенциала высших учебных заведений Санкт-Петербурга, организации трудоустройства и временной занятости студентов и выпускников.

Мероприятия раздела 5 «Информационное и научное обеспечение деятельности системы высшего профессионального образования Санкт-Петербурга, развитие ее экспортного потенциала» нацелены на создание условий, способствующих продвижению высших учебных заведений на внутреннем и внешнем рынке образовательных услуг, изучения возможностей и проблем их развития.

Реализация плана позволит обеспечить достижение показателей социально-экономического развития нашего города в части высшего профессионального образования, а в стратегическом плане — закрепление позиций Санкт-Петербурга как одного из ведущих центров науки, высшего образования и инноваций, результаты научной и образовательной деятельности которого способствуют модернизации и технологическому развитию экономики всей России.

Как сказал Президент Российской Федерации Д.А. Медведев, «сегодня профессиональное образование должно в полной мере учитывать требования рынка труда XXI века, полностью соответствовать общемировым критериям качества. Для этого необходима модернизация вузов, колледжей, техникумов и училищ, укрепление их преподавательского состава, усиление практической направленности в учебном процессе. И, конечно, самое тесное взаимодействие с производством». На решение именно этих задач нацелен План мероприятий по развитию высшей школы Санкт-Петербурга на 2011–2015 годы.

ИНТЕГРАЦИЯ АКАДЕМИЧЕСКОЙ И ВУЗОВСКОЙ НАУКИ В ИННОВАЦИОННОМ ПРОЦЕССЕ

В XXI веке стало ясно, что единственный путь решения большинства проблем нашей страны, да и других государств — это инновационное развитие.

Инновации, обеспечивающие социально-экономический прогресс и повышение качества жизни, — это цель и средство государственной политики.

Поэтому провозглашен курс на системную модернизацию страны, создание технологических платформ, развитие nanoиндустрии, информатики и других высокотехнологичных отраслей. Но при этом, учитывая ограниченность ресурсов, определены приоритетные направления развития экономики, в большей степени требующие инноваций.

Инновации зарождаются, как правило, в результате фундаментальных исследований, т. е. изучения новых явлений природы, установления неизвестных доселе взаимосвязей и зависимостей.

Затем инновационная идея проходит ряд этапов с участием учреждений академической,

отраслевой и вузовской науки, выполняющих фундаментальные, прикладные исследования и опытно-конструкторские разработки.

Какие же проблемы встречаются на пути инноваций?

Прежде всего, это недостаток финансирования, особенно по фундаментальной науке.

Если рассмотреть все расходы на НИОКР в мире, то доля России составляет всего 2,2 %, в то время как доля США — 35 %, Евросоюза — 24 %, Японии — 13 %, Китая — 11 %.

Также следует отметить, что в Российской Федерации государственный бюджет является основным источником финансирования отечественной науки, в отличие от передовых стран, где львиная доля средств на науку идет от предпринимательских структур. Так, например, в США эта доля около 70 %, а в Японии — 85 %. При том, что численность исследователей у нас уменьшилась (рис. 1), а в других странах — технологических лидерах — наблюдается устойчивый рост числа ученых (особенно в Китае).

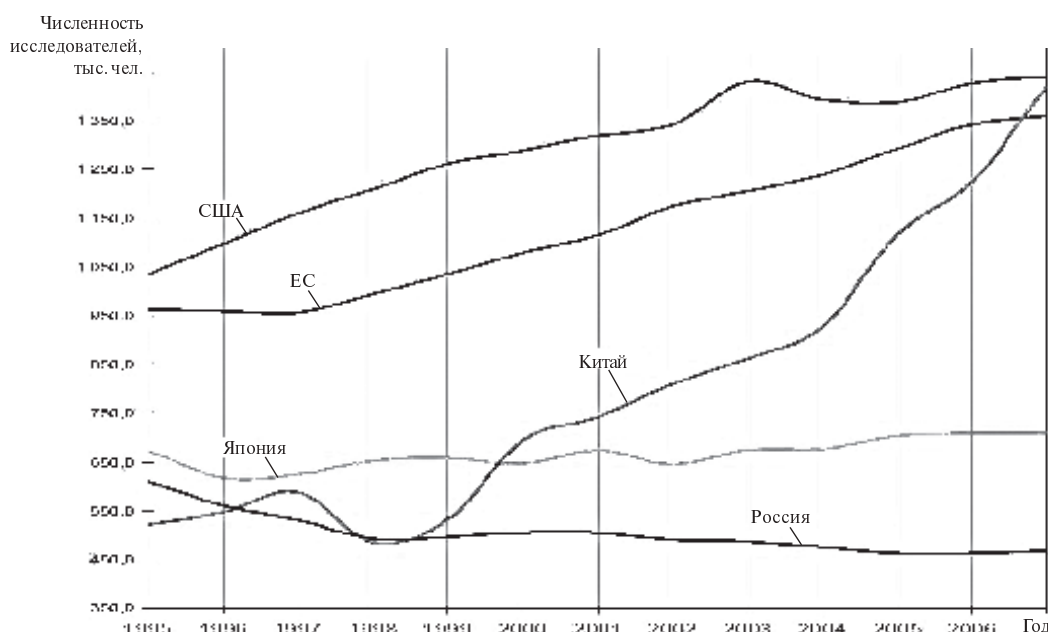


Рис. 1. Динамика изменения численности исследователей в разных странах мира

Недостаток финансирования приводит к тому, что затраты на одного исследователя в год составляют в России 50 тыс. долл., в то время как в Японии — более 200 тыс. долл., а в США — почти 280 тыс. долларов.

Наряду с недофинансированием прямых затрат на содержание исследователей в России в последние десять лет наблюдается резкое снижение расходов на оснащение научно-исследовательского процесса.

На рис. 2 показано, как снизились и фондовооруженность, и техновооруженность российских исследователей.

Недостаточное финансирование, устаревшее оборудование, отсутствие необходимых материалов, реактивов, измерительных приборов не позволяют нашим ученым вносить свой вклад в инновационное развитие. А низкие зарплаты, отсутствие хороших жилищных условий заставляют многих задуматься об отъезде за границу. Что касается ученых из-за рубежа, то по этим же причинам они отказываются ехать на работу в Россию.

Правда, в последние годы в России принимаются определенные меры по улучшению ситуации. Так в выступлении Председателя Правительства РФ В.В. Путина на общем собрании Российской академии наук было сказано, что в федеральном бюджете этого года 10 % расходной части отводится на фундаментальную и прикладную науку, высшее образование и ряд федеральных программ инновационной направленности.

Но, как можно понять, это — сумма затрат по нескольким статьям расхода, в том числе по таким крупным проектам, как энергосбереже-

ние, космические, ядерные, медицинские, информационные технологии. На них идет львиная часть ассигнований.

Кроме того, большая часть финансовых средств отводится на развитие науки в вузах.

Все это, конечно, важные направления вложения средств. Но это не снимает вопрос о прямом финансировании фундаментальной академической науки.

Нельзя противопоставлять научные учреждения системе образования. У нас уже сейчас в очень тяжелом положении находится отраслевая наука. Если еще и фундаментальной науке не выделять достаточных средств, то мы можем прийти к печальным последствиям. Мы можем столкнуться с ситуацией, когда в нашу страну будут сбрасываться устаревшие, экологически опасные технологии, которые некому будет даже проэкспертировать и отвергнуть.

Хотелось бы надеяться, что доля затрат на исследования и разработки в ВВП будет увеличиваться. Такая тенденция подтверждается и прогнозом международных экспертов на период до 2030 года.

Как видно из приведенной ниже таблицы (табл. 1), Россия по этому показателю к 2020-му году переместится с 10-го на 6-е место, а к 2030-му займет 4-ю позицию.

На наш взгляд, для активизации инновационной деятельности необходимо предпринять ряд действий.

В Санкт-Петербурге уже многое делается в этом направлении. Правительство города принимает меры по поддержке ученых: существуют премии за выдающиеся научные результаты по



Рис. 2. Фондовооруженность и техновооруженность исследователей (в ценах 1995 года)

Таблица 1

**Прогноз внутренних затрат на исследования и разработки
в процентах к валовому внутреннему продукту России и других стран**

2010			2020			2030		
Место	Страна	%	Место	Страна	%	Место	Страна	%
1	Япония	3,3	1	Япония	3,5	1	Япония	3,6
2	США	2,9	2	США	3,2	2	США	3,3
3	Германия	2,7	3	Германия	3,0	3	Германия	3,2
4	Франция	2,2	4	Франция	2,7	4	Франция	3,1
5	Канада	2,1	5	Канада	2,5	5	Канада	3,0
6	Великобритания	1,9	6	Великобритания	2,4	6	Великобритания	2,6
7	Китай	1,8	7	Китай	2,3	7	Китай	2,5
8	Индия	1,6	8	Индия	2,3	8	Индия	2,5
9	Италия	1,3	9	Италия	2,3	9	Италия	2,4
10	Россия	1,2	10	Россия	1,8	10	Россия	2,2

различным отраслям знаний, учреждены гранты в области научной и научно-технической деятельности, осуществляется поддержка малых инновационных предприятий, проводятся конкурсы лучших инновационных проектов.

Вместе с тем требуется дальнейшее усиление интеграции науки и образования. Эти две сферы должны не соперничать между собой, а работать совместно с целью создания мощного инновационного потенциала.

Примеры тесной интеграции у нас уже есть. Это, прежде всего, Академический университет, созданный и возглавляемый Жоресом Ивановичем Алферовым.

Наряду с основной своей функцией — реализацией программ высшего специального, послевузовского и дополнительного образования в различных областях общей и прикладной физики — Академический университет проводит фундаментальные и прикладные научные исследования, научно-технические, научно-производственные и опытно-конструкторские работы.

Отличительной особенностью Академического университета является совершенствование созданной «интегрированной» системы непрерывного образования (школа — вуз — аспирантура — докторантура), обеспечивающей подготовку квалифицированных специалистов в рамках единого научно-образовательного процесса.

Надо сказать, что в области качества в Санкт-Петербурге сформирована аналогичная многоуровневая система подготовки кадров и научных исследований (рис. 3). Исследования

в области экономики качества проводятся в Санкт-Петербурге группой специалистов, получившей статус научной школы.

Экономика качества все больше привлекает внимание исследователей при рассмотрении самых разных проблем социально-экономического развития, и результаты их работ позволили нам обеспечить широкое внедрение прогрессивных методов управления качеством. Прежде всего речь идет о системах менеджмента качества на основе международных стандартов. Такие системы уже функционируют во многих вузах, и это дает осязаемый положительный эффект в инновационном развитии.

Общая схема инновационного процесса в условиях интеграции академической и вузовской науки Санкт-Петербурга будет выглядеть следующим образом.

Основные участники инновационного процесса:

академическая, отраслевая и вузовская наука — разработчики новшеств;

учреждения среднего специального и высшего образования, учебные подразделения научно-исследовательских институтов, академические университеты, готовящие квалифицированные кадры.

При этом наука и образование должны тесно взаимодействовать, помогая друг другу в достижении целей инновационного развития.

Появляющиеся в результате такого сотрудничества инновационные проекты должны проходить строгую научно-техническую и экономи-



Рис. 3. Многоуровневая система подготовки кадров и научных исследований Санкт-Петербурга

ческую экспертизу с участием представителей Научно-технического совета при Правительстве Санкт-Петербурга, Промышленного совета при губернаторе, Союза промышленников и предпринимателей Санкт-Петербурга, Совета ректоров вузов города.

И только при положительной оценке предлагаемые инновационные проекты могут пере-

даваться для реализации еще одной группе участников инновационного процесса — предприятиям-изготовителям новшества.

Реализация предложенной схемы действий позволит эффективнее использовать имеющийся в нашем городе потенциал для достижения главной цели — повышения качества жизни горожан.

В.Н. Лобко

ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ И ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНОЙ ПОДГОТОВКИ В ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ: ИСТОРИЧЕСКИЙ ОПЫТ И СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ

Уважаемые участники конгресса!

11–12 ноября 2010 года в Петербургском государственном университете путей сообщения состоялась Международная научно-методическая конференция «Проблемы математической и естественно-научной подготовки в инженерном образовании. Исторический опыт — современные вызовы».

Тема и цель конференции, конечно, не случайны. Качество инженерной и школьной подготовки падает, несмотря на все старания как

государства, так и научно-педагогической общесственности. Преподаватели вузов сетуют на плохую школьную подготовку, школьные учителя ссылаются на отсутствие отработанных учебников, а медики говорят о перегрузке школьников. На рубеже XXI века перед Россией стоят сложнейшие задачи, и совершенствование образования — как естественно-научного, так и инженерного — является первоочередной из этих задач.

Цель конференции состояла в обобщении исторического опыта, накопленного в России

и за рубежом, в выработке рекомендаций по содержанию, структуре, формам и методам математического и естественнонаучного образования в технических вузах.

Перечислю еще раз вопросы, которые рассматривались на конференции:

В чем состоит исторический опыт, накопленный в России, и как его использовать?

Как ликвидировать дисбаланс школьной подготовки и вузовских требований к абитуриентам?

Как улучшить подготовку школьников по математике и физике?

Как, по каким программам и в течение какого времени должна осуществляться подготовка в вузе?

Кого должен готовить вуз? Грамотного инженера-конструктора, обладающего глубокими фундаментальными знаниями и широким научным и жизненным кругозором, широкопрофильного бакалавра, не имеющего специальной подготовки, или специалиста, способного в кратчайшие сроки после окончания вуза включиться в производство?

Место проведения конференции выбрано не случайно. Ровно 200 лет тому назад (в 1810 году) 1 ноября по старому стилю в Институте корпуса инженеров путей сообщения начались занятия по подготовке специалистов с высшим образованием.

Программа Института содержала одновременно фундаментальную, общеинженерную и специальную подготовку. Принципиальные основы этой программы выдержали проверку временем и стали образцом для других высших технических школ России, которые открывались в течение XIX века.

Содержание раздела дифференциального исчисления в курсе «Высшая математика» 1818 года, практически соответствует современному курсу.

Институт корпуса инженеров путей сообщения оставался долгое время единственным техническим вузом, где такие дисциплины, как высшая математика, физика, химия, теоретическая и прикладная механика и другие, составляющие предмет строительного искусства, читались в полном объеме самыми авторитетными учеными, членами Академии наук В.И. Висковатовым, С.Е. Гурьевым, П.П. Базеном, Д.С. Чижовым, Г.И. Гессом, Б. Клапейроном, Г. Ламе, В.Я. Буныakovским, М.В. Остроградским и другими.

В последние десятилетия XIX века строительство сотен крупных промышленных предприятий, прокладка тысяч километров железных дорог, развитие средств связи, переход от использования паровой энергии к электричеству поставили в повестку дня первым по значимости вопрос о придании нового импульса математическому и естественнонаучному образованию.

В первой половине XX-го столетия возникли десятки новых технических вузов. Преподавание в них естественнонаучных и математических дисциплин было построено на основе тщательного учета дореволюционного опыта. Шарахання первых послереволюционных лет в области методики преподавания в высшей школе ко второй половине 30-х годов остались позади. Сформировалась отечественная школа, основной особенностью которой стала фундаментальная математическая и естественнонаучная подготовка будущих специалистов.

Сегодня основными задачами высшей технической школы являются формирование у выпускников вузов системы необходимых знаний, умений и навыков, а также развитие способности и готовности применять эти знания в профессиональной деятельности.

Но как достичь этих целей при снижении уровня довузовской подготовки?

Складывается парадоксальная ситуация: единые государственные экзамены сданы положительно, а базовых знаний, позволяющих продолжить образование, нет. Вот один из выводов, который напрашивается из анализа рейтинга государственных вузов России по среднему баллу ЕГЭ:

В вузы на технические направления в 2010 году поступили «троечники». Например, металлургии будут обучаться абитуриенты со средним баллом — 51,32, энергомашиностроению — 54,28; электротехнике — 56,44.

Среди технических и технологических государственных вузов Университет путей сообщения занимает 12-е место из 139 вузов (с результатом — 67,5 балла). Казалось бы, не должно быть проблем с обучением первокурсников математике и другим фундаментальным дисциплинам. Но беда в том, что сами баллы ЕГЭ как оценка знаний не объективны. Поэтому и расходятся существенно оценки, предъявляемые абитуриентами при поступлении в вуз, и данные внутреннего тестирования на кафедрах математики и физики.

Что вуз должен уже сегодня делать, чтобы восполнить недостаток знаний, базовых не только для будущих специалистов в технике и технологиях, но и для будущих экономистов, программистов и других нетехнических категорий специалистов?

В модернизации высшего технического образования этим задачам соответствует два направления.

Первое, которое можно назвать фундаментализацией образования, состоит в поиске путей повышения качества фундаментальной подготовки будущего инженера — его базовых, системообразующих знаний.

Второе — это компетентностный подход в обучении, сфокусированный на умении применять получаемые знания в практической деятельности.

Фундаментальные знания обеспечивают инженеру возможность понимать и осваивать новую технику и технологии, новые принципы организации производства. Знания по математике являются базовыми, «сквозными» для инженерных специальностей

По мнению участников конференции, среди причин недостаточной математической подготовки — несоответствие сложившегося, традиционного содержания обучения математике в технических вузах целям обучения и низкая востребованность математики в специальных дисциплинах. Содержание математического образования является сокращенным изложением основных математических дисциплин, читаемых на математических факультетах классических университетов, и почти не связано с инженерной специальностью студента, а потому не способствует получению качественной фундаментальной математической подготовки.

Каков же опыт других стран в области образования?

Прежде всего, обратимся к опыту США.

В июне 1999 года решением министра образования США была создана «Национальная комиссия США по преподаванию математики и естественных наук в XXI веке» под председательством первого американского астронавта Джона Гленна. Осенью 2000 года комиссия Гленна выработала документ под названием «Пока еще не слишком поздно». Главная идея документа такова: страна, которая хочет адекватно отвечать вызовам времени, должна опираться в первую очередь на хорошее математическое

и естественнонаучное образование — иначе у этой страны нет будущего.

К аналогичным выводам пришли и в Норвегии. Предпринятые в этой стране начиная с 1994 года шаги по созданию так называемой «школы для всех» привели по сути к краху образования. Результатом резкого сокращения математики и естественнонаучных дисциплин или замены их на интегрированный курс «Естествознание» стало то, что многие выпускники, поступающие в норвежские университеты, оказались не в состоянии овладеть фундаментальными дисциплинами.

В итоге в настоящее время и в США, и в Норвегии главный вектор реформ направляют в сторону усиления математического и естественнонаучного образования.

К сожалению, и многие направления сегодняшней модернизации России ведут к дефундаментализации образования.

В июле прошлого года были опубликованы проекты федеральных базисных учебных планов, устанавливающих перечень обязательных школьных предметов и число часов для их изучения. Эти проекты вызывают глубокую обеспокоенность за качество естественнонаучной подготовки школьников: так, из 12 профилей предмет химия сохраняется лишь в двух, биология — в трех, а физика — в пяти. В остальных профилях эти дисциплины включены в интегрированный курс «Естествознание». Особую озабоченность вызывает отсутствие общеобразовательного направления; нетрудно показать, что идея всеобщей профилизации вообще нереализуема в России, где 70 % школ — это сельские школы.

Принципиальным вопросом для вузов, да и системы образования в целом, является четкое определение образования как общественного или частного блага: образование — это целенаправленный процесс воспитания и обучения в интересах человека, общества, государства или это образовательная услуга частному лицу? Было отмечено, что обращение в отечественном образовании к понятию «образовательная услуга» противоречит статье 43 Конституции РФ, согласно которой образование граждан определяется как обязанность государства. Кроме того, гражданские правоотношения в сфере образования попадают под действие Закона о правах потребителя, согласно которому расторгнуть договор с заказчиком услуги можно только по решению суда. Представьте теперь, как у нас будет проходить

отчисление студентов за академическую неуспеваемость. Вузы не будут выходить из судов.

Качественное образование для всех слоев населения должно стать основой для инновационного прорыва в науке и технике, основой социально-экономической стабильности.

**Математическое и естественно-
научное образование
в XXI-м веке. Каким оно должно быть?**

Во-первых, математика — важнейшая наука, созданная нашей цивилизацией и сопровождающая ее на всех этапах развития. Вся современная наука — физика и химия, биология и экономика, лингвистика и социология, другие фундаментальные науки — использует математические методы и строится по математическим законам. Путь в современную науку и технику, просто в современную жизнь лежит через математику. Этот элемент научного знания является важнейшей частью образования.

Во-вторых, математическое образование не только часть науки математики — это феномен

общечеловеческой культуры. Оно является отражением истории развития человеческой мысли. Именно поэтому математическое образование всегда играло важную роль в культурном развитии человека. При этом возможности математического образования далеко выходят за границы собственно математических предметов. Математика — это язык, математическое образование может и должно стать средством языкового развития учащихся, научить их коротко, грамотно, точно и логично формулировать свои мысли.

Хочу завершить свой доклад словами Президента Российского союза ректоров академика В.А. Садовниченко: «Нам важно сохранить преемственность инженерных школ и поколений, которые в прошлом проектировали российские космические программы, создавали промышленную базу и обеспечивали оборонную мощь нашей страны. Нам необходимо помнить, что слава отечественной инженерной школы, до сих пор питающей своими плодами мировую индустрию и науку, основывается на фундаментальном образовании, в том числе в области математики».

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ НА ПРОЧНОСТЬ И РЕСУРС ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЭС ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМАХ

Важнейшая задача повышения надежности и долговечности элементов котлов и трубопроводов тепловых электростанций (ТЭС) — предотвращение опасности хрупких разрушений основных элементов, которая связана с возможным ростом первичных трещиноподобных дефектов технологического или эксплуатационного происхождения при напряжениях, меньше допускаемых при расчетах.

Наиболее ответственные элементы оборудования ТЭС — это толстостенные оболочечные элементы (барабаны котлов высокого давления, корпуса подогревателей высокого давления (ПВД) и др.), изготовленные из листовой стали и работающие под действием внутреннего давления. Типичный технологический дефект таких элементов — расслоение, которое представляет несправку внутри металла. Дефект возникает в процессе проката слитка в виде единичной трещины или совокупности трещин, расположенных параллельно срединной поверхности листа, и, как правило, представляет собой раскатанные рыхлоты, неметаллические включения, газовые пузыри. Расслоения в виде раскатанных шлаковых включений (рис. 1) часто встречаются в барабанах котлов, изготовленных в 60–70-х годах прошлого века.

Действующие в теплоэнергетике нормы и правила [1, 2] прямо или косвенно запрещают эксплуатацию конструкции с трещинами. Используемые при проектировании элементов котлов, сосудов и трубопроводов «Нормы расчета на прочность» основаны на предположении об отсутствии в материале трещиноподобных дефектов и не учитывают опасности развития уже имеющихся повреждений (прежде всего трещин) и образования новых.

Анализ напряженно-деформированного состояния элементов энергооборудования с расслоениями показывает, что к основным факторам, которые могут привести к развитию расслоений, следует отнести изгибные напряжения, действующие в днищах, вблизи отверстий и сварных швов, а также температурные неравномерности, возникающие при нестационарных режимах эксплуатации. Присутствие трещиноподобных дефектов типа расслоения вносит существенный вклад в неоднородность тепловых полей, что приводит к возникновению дополнительных деформаций и напряжений и в свою очередь может быть причиной появления новых трещин и распространения уже имеющихся.

Постановка задачи

Целью нашей работы была оценка влияния расслоения на прочность и долговечность цилиндрических элементов тепломеханического оборудования при нестационарных температурных воздействиях. На примере обечайки котельного барабана с расслоением выполнено расчетное определение напряженно-деформированного состояния вблизи дефекта. Внутренний диаметр

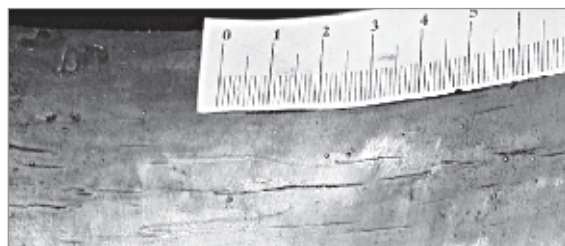


Рис. 1. Вид поперечного сечения образца, вырезанного из зоны расслоения

барабана обычно находится в пределах 1600–1800 мм, толщина стенки составляет 90–115 мм. Материал — сталь 22К или 16ГНМА.

Рассматривался наиболее часто встречающийся тип расслоений — параллельный поверхностям листа. Такие дефекты, если они расположены вне зоны концентраторов напряжений и сварных швов, не будут развиваться от действия основной нагрузки — внутреннего давления, поскольку наибольшие окружные и осевые напряжения направлены вдоль участков расслоения, а радиальные напряжения являются сжимающими.

По данным разрушающего контроля «сплошное» по результатам УЗК расслоение на самом деле может состоять из отдельных раскатанных включений, параллельных друг другу. Поэтому для изучения процессов разрушения важно знать напряженно-деформированное состояние непосредственно в зоне возможного зарождения трещин (окрестность расслоений и области между ними) с учетом их взаимовлияния.

Заменим реальный дефект трещиной, искривленной по цилиндрической поверхности. Для оценки влияния таких параметров, как скорости нагрева — расхолаживания, длины расслоения и т. д. на напряженно-деформированное состояние вблизи трещины, а также характер взаимовлияния трещин, рассмотрим плоскую задачу для толстостенной обечайки с одной или тремя дугообразными трещинами под действием нестационарного температурного поля (рис. 2). На внешней поверхности и торцах обечайки заданы условия идеальной теплоизоляции. На внутренней поверхности осуществляется конвективный теплообмен со средой, коэффициент теплоотдачи которой λ считаем постоянным. Рассмотрим два варианта тепловых граничных условий, которые соответствуют различным нестационарным режимам эксплуатации котельного

оборудования: режим «пуск — выдержка (выход на стационарный режим) — останов» и аварийный режим (тепловой удар).

Как правило расслоение имеет вид раскатанного неметаллического включения с пониженными теплопроводящими свойствами. Поэтому в расчете примем, что берега трещины теплоизолированы. Такое допущение идет в запас прочности.

Поскольку решение поставленной задачи в научно-технической литературе отсутствует, численное решение было получено методом конечных элементов [3] в программном комплексе ANSYS.

Соотношения, определяющие условия страгивания трещины

При сравнительно низком уровне напряжений возможен докритический рост трещин по механизму усталости. Для элементов ТЭС, работающих при умеренных температурах (барабаны котлов, корпуса деаэраторов, гибы трубопроводов), скорость трещины при действии циклической нагрузки определяется законом Пэриса [4]

$$\frac{dl}{dN} = A(\Delta K_{\text{эКВ}} - \Delta K_{th})^n, \quad (1)$$

где N — число циклов; dl/dN — скорость роста трещины; $\Delta K_{\text{эКВ}}$ — размах эквивалентного коэффициента интенсивности за цикл; A и n — постоянные материала; K_{th} — пороговый коэффициент интенсивности. Для углеродистых сталей в зависимости от окружающей среды и величины $\Delta K_{\text{эКВ}}$ скорость роста трещины находится в интервале от 10^{-8} до 10^{-3} мм/цикл [5, 6].

Локальный критерий разрушения в общем виде записывается через эквивалентный коэффициент интенсивности следующим образом:

$$K_{\text{эКВ}} = f(K_I, K_{II}, K_{III}) = K_{Ic},$$

где K_I, K_{II}, K_{III} — коэффициенты интенсивности напряжений; f — функция, определяемая из физических соображений. Если принять, что подрастание трещины будет происходить в направлении θ действия максимальных окружных напряжений [5] (критерий максимальных окружных напряжений $\sigma_{\theta\max}$), то

$$K_{\text{эКВ}} = K_I \left\{ \frac{1}{4} \left(\cos \frac{3\theta}{2} + 3 \cos \frac{\theta}{2} \right) - \right.$$

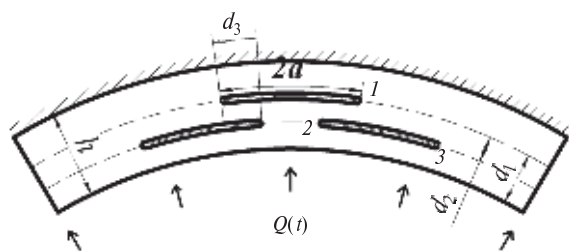


Рис. 2. Положение расслоения в обечайке

$$-\frac{3}{4}\left(\sin\frac{3\theta}{2}+\sin\frac{\theta}{2}\right)\frac{K_{II}}{K_I}\Bigg\};$$

$$\theta=2\arctg\left(\frac{1}{4}\frac{K_I}{K_{II}}\pm\frac{1}{4}\sqrt{\frac{K_I^2}{K_{II}^2}+8}\right). \quad (2)$$

В частном случае трещины поперечного сдвига (тип разрушения II) получаем, что угол θ согласно критерию $\sigma_{\theta \max}$ принимает значения $\pm 70,5^\circ$; K_{IIc} равно $1,15 K_{Ic}$.

Результаты для случая одиночного расслоения

Наиболее часто расслоения в корпусах оборудования ТЭС расположены в средней трети листа, поэтому ограничимся рассмотрением таких случаев. Вычисления показывают, что в режиме пуска (нагрева) вблизи вершины трещины напряженное состояние является чистым поперечным сдвигом ($K_I = 0$, $K_{II} \neq 0$). В режиме расхолаживания $K_I \neq 0$, $K_{II} \neq 0$.

Максимальные значения коэффициентов интенсивности напряжений соответствуют тому моменту, когда разность между температурами верхнего и нижнего берегов трещины доходит до максимума. При небольших скоростях нагрева этот максимум достигается в конце нестационарного режима, при тепловом ударе — через несколько минут после начала взаимодействия со средой. Применительно к барабанам котлов число циклов «пуск-останов» обычно не превышает 1000. Отсюда усталостное подрастание расслоения, вычисленное по формуле (1), за все время

эксплуатации не превысит 1 мм, и его можно не принимать во внимание.

На примере обечайки из стали 22К ($D = 1600$ мм, $h = 90$ мм, $\lambda = 10000$ Вт/(м·°С)) с расслоением рассмотрим, как изменяются значения коэффициентов интенсивности при увеличении длины трещины. Величина K_I монотонно растет, пока длина трещины не достигнет некоторого значения ($2a = 600$ мм при скорости охлаждения 5 град/мин; $2a = 400$ мм при термоударе), а затем начинает убывать (рис. 3). Объясняется это тем, что начиная с некоторой величины a скорость роста $\partial\sigma/\partial a$ температурных напряжений, вызываемых возмущенным температурным полем, начинает уменьшаться. На рис. 3 штриховой кривой показана зависимость относительного раскрытия расслоения $\delta/2a$ от его длины (δ — раскрытие расслоения в центре). На основании этого можно ввести понятие эквивалентной длины расслоения $2a^*$, определив ее как величину, при которой достигается максимум $K_{экр}$. Величина $2a^*$ зависит от многих параметров: свойств металла и среды, положения расслоя по толщине, скорости охлаждения и др.

При небольших размерах трещины (до 300 мм для расчетного примера) величина K_{II} по абсолютной величине при нагреве и расхолаживании приблизительно одинакова. С увеличением длины расслоения до 400 мм и более значение K_{II} при нагреве продолжает расти, а при охлаждении — начинает уменьшаться.

Таким образом, в режиме нагрева трещина вне зависимости от длины является сдвиговой.

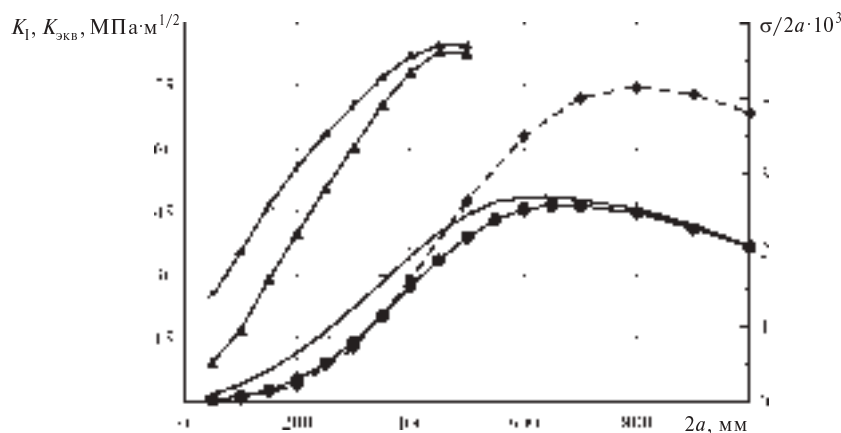


Рис. 3. Зависимость коэффициентов интенсивности напряжений от длины расслоения при расхолаживании ($d_1 = h/2$)

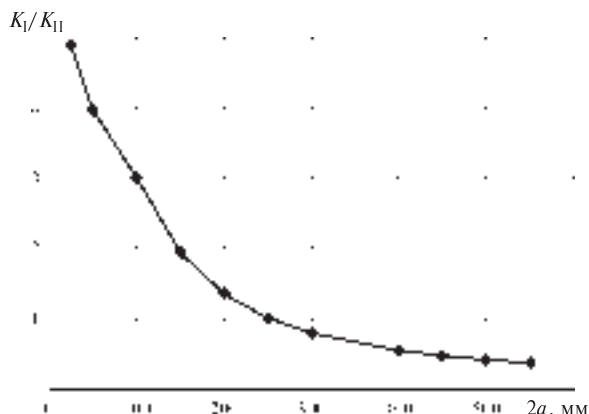


Рис. 4. Зависимость отношения K_{II}/K_I от длины расслоения при расхолаживании со скоростью 5 град/мин ($d_1 = h/2$)

В режиме расхолаживания трещина, небольшая по размеру, также сдвиговая, при увеличении длины она относится к смешанному типу, а при дальнейшем увеличении длины напряженно-деформируемое состояние вблизи вершины трещины фактически контролируется в основном значением K_I (рис. 4).

Согласно критерию максимальных окружных напряжений направление подрастания трещины смешанного типа определяется формулой (2), а в случае трещины поперечного сдвига

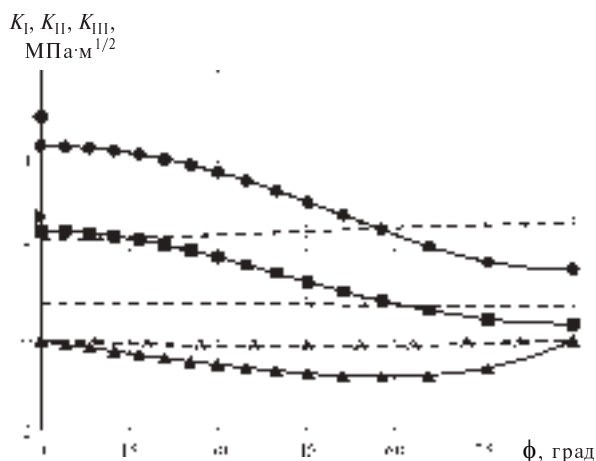


Рис. 5. Распределение коэффициентов интенсивности вдоль фронта эллиптической трещины при расхолаживании со скоростью 5 град/мин:
 ▲ — K_I , $b/a = 1$; ● — K_{II} , $b/a = 1$; ■ — K_{III} , $b/a = 1$;
 △ — K_I , $b/a = 2$; ○ — K_{II} , $b/a = 2$; □ — K_{III} , $b/a = 2$;
 ► — K_I (плоское решение);
 ◆ — K_{II} (плоское решение)

развитие будет происходить под углом $70,5^\circ$ относительно своего начального направления. Но поскольку максимальное значение K_{II} достигается при высоких температурах (при $T \gg T_k$, где T_k — переходная температура хрупкости), то в режиме нагрева разрушение не наблюдается. При расхолаживании максимум K_I достигается при сравнительно невысоких температурах ($T \approx T_k$ для стали 22К, $T_k \approx 70^\circ\text{C}$ после длительной эксплуатации), поэтому этот режим наиболее опасен с позиций разрушения. В рассмотренном примере $K_{экр}$ (рис. 3) не достигает критического значения: $K_{Ic} > 80 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ для стали 22К.

Оценка коэффициентов интенсивности напряжений по принятой плоской модели обечайки с расслоением идет в запас. Полученные из решения плоской задачи значения коэффициентов интенсивности напряжений будут близки к точным для расслоений, сильно вытянутых в продольном направлении.

Пусть $2a$ — наибольший размер в окружном направлении реального расслоения. Результаты окажутся существенно завышенными, если размер расслоения вдоль продольной оси меньше или приблизительно равен $2a$. Для оценки погрешности плоской модели была решена трехмерная температурная задача для обечайки с эллиптическим в плане расслоением, полуось которого в окружном направлении равна a , в продольном — b . Сравнение решений показало, что при $b/a = 4$ решение двумерной задачи дает значения K_I и K_{II} , которые на 10 % превышают соответствующие значения, полученные из трехмерного решения, а при $b/a = 1$ решения отличаются более чем в 2 раза (рис. 5).

Результаты для случая нескольких трещин

В случае задачи для трех трещин показано, что взаимодействие приводит к увеличению коэффициентов интенсивности напряжений по сравнению со случаем изолированной трещины (рис. 3, 6). Оказалось, что наибольшие значения K_I , K_{II} , $K_{экр}$ достигаются при небольшом перекрытии трещин ($d_3 < 0$). Величина коэффициентов интенсивности определяется скоростью изменения температуры, положением по толщине обечайки, длиной каждого из расслоений.

Растягивающие напряжения принимают наибольшие значения в вытянутой области между соседними вершинами трещин (рис. 7). В этом



месте наиболее вероятно возникновение трещины, которая будет направлена вдоль линии, соединяющей соседние вершины (вершины 1 и 2 на рис. 2). Иначе говоря, перемычки между близкорасположенными расслоениями могут разрушаться, приводя к слиянию расслоений. Таким образом, при расчете отдельные расслоения, расположенные на одном уровне по толщине обечайки или достаточно близко друг к другу, следует аппроксимировать одним расслоением

Обсуждение результатов

В работе методом конечных элементов получены численные оценки коэффициентов интенсивности напряжений в обечайках котельных барабанов с расслоениями для случая, когда расслоение удалено от концентраторов напряжений (сварных швов и отверстий). Рост трещин от такого вида включений возможен при нестационарных температурных воздействиях. При нагревании вблизи конца расслоения реализуется нагружение, близкое к поперечному сдвигу, при расхолаживании — нагружение смешанного типа. Опасность развития расслоений состоит в том, что подрост трещин будет происходить под углом к поверхности листа с возможным выходом трещины на поверхность, что потребует замены конструкции. Для конкретного расчетного примера (обечайка барабана котла высокого давления типоразмером 1600×90 мм) изолированное расслоение, параллельное поверхности листа, является малозначительным дефектом вне зависимости от его размера: коэффициенты интенсивности напряжений не достигают критических значений, а небольшое количество температурных циклов позволяет не учитывать усталостный подрост расслоения. В общем случае основным мероприятием, обеспечивающим безопасную эксплуатацию конструкции с расслоением при температурных воздействиях, является ограничение скорости нагрева — расхолаживания.

Особенность температурной задачи для элементов с расслоением — возможность введения в рассмотрение понятия эквивалентной длины расслоения, при которой коэффициенты интенсивности напряжений достигают максимальных значений в режиме расхолаживания. Иначе говоря, при любом размере расслоения значения коэффициентов интенсивности при заданной скорости нагрева не будут превышать значений,

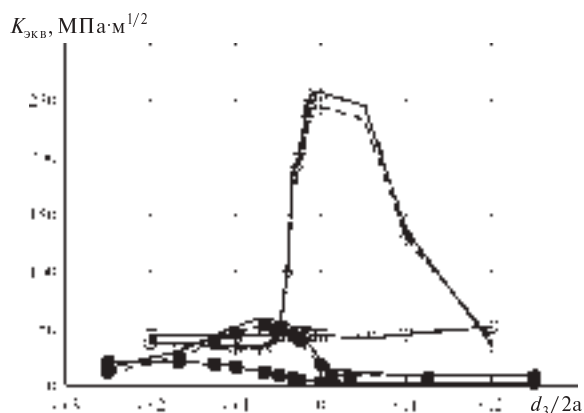


Рис. 6. Эквивалентный коэффициент напряжений $K_{\text{экв}}$ в вершинах трещин при различном их взаимном расположении: в вершинах 1 (\triangle — $2a = 150$ мм; \triangle — $2a = 300$ мм), 2 (\bullet — $2a = 150$ мм; \circ — $2a = 300$ мм) и 3 (\blacksquare — $2a = 150$ мм; \square — $2a = 300$ мм)

соответствующих сильно вытянутому в продольном направлении расслоению, размер которого в окружном направлении равен эквивалентной длине $2a^*$. В рассмотренном примере при скорости расхолаживания 5 град/мин эквивалентная длина расслоения составляет 600 мм, а соответствующее значение эквивалентного коэффициента интенсивности напряжений составляет $47 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Расчеты, выполненные для случая нескольких расслоений, показали, что взаимовлияние нескольких расслоений, когда они находятся в параллельных плоскостях на расстоянии не-

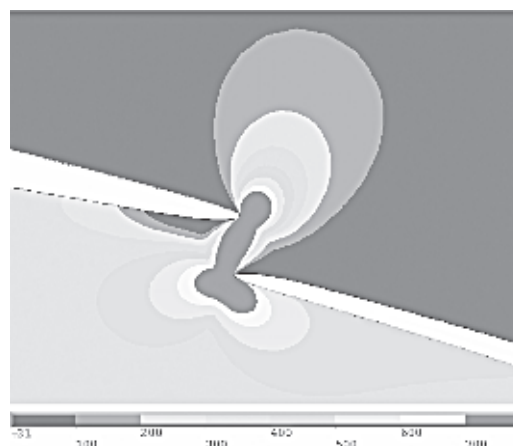


Рис. 7. Распределение условно-упругого напряжения σ_1 , МПа, между вершинами соседних расслоений

скольких миллиметров с небольшим перекрытием, может привести к слиянию таких расслоений.

Таким образом, численно подтверждаются результаты многолетних наблюдений за состоянием зон расслоя в днищах и обечайках барабанов котлов высокого давления и корпусах ПВД: появление новых участков расслоя в процессе эксплуатации не происходит, в то же время возможно увеличение отдельных участков расслоя за счет их слияния (объединения).

По результатам выполненного исследования можно рекомендовать следующее: при расчетах на прочность элементов сосудов давления и паровых котлов с расслоениями протяженную область расслоения, состоящего из отдельных включений, следует моделировать «сплошным» эквивалентным дефектом. В качестве размера этого дефекта следует принять наибольший размер зоны расслоения в окружном направлении L_{\max} , если L_{\max} меньше $2a^*$, или равным $2a^*$, если L_{\max} больше, чем $2a^*$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов [Текст] : ПБ 10-574-03.— М., 2007.
2. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды [Текст] : РД 10-249-98.— М., 2000.
3. Морозов, Е.М. Метод конечных элементов в механике разрушения [Текст] / Е.М. Морозов, Г.П. Никишков.— М.: ЛКИ, 2008.— С. 33.
4. Махутов, Н.А. Механика малоциклового разрушения [Текст] / Н.А. Махутов.— М.: Наука, 1986.
5. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения [Текст] / Г.П. Черепанов.— М.: Наука, 1974.— С.149.
6. Code ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section XI, Division 1,3 [Текст].— Ed. 2004.
7. Морозов, Н.Ф. Математические вопросы теории трещин [Текст] / Н.Ф. Морозов.— М.: Наука, 1984.
8. Петреня, Ю.К. Физико-механические основы континуальной механики повреждаемости [Текст] / Ю.К. Петреня.— СПб., 1997.

УДК 621.1

*В.В. Петин, А.Г. Батухтин,
А.В. Калугин, П.Г. Сафронов*

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Использование электрической энергии для нужд теплоснабжения — распространенная мировая практика. В России широкое применение комбинированной выработки тепловой и электрической энергии в значительной мере снижает потребление электрической энергии, идущее на отопление и горячее водоснабжение, поскольку отпуск теплоты от отборов теплофикационных турбин имеет большую эффективность. При этом современное развитие техники открывает более эффективные способы использования электроэнергии в системах централизованного теплоснабжения. К таким способам можно отнести

применение тепловых насосов, а также электро-разрядных технологий обеззараживания воды при открытом разборе сетевой воды для нужд горячего водоснабжения (ГВС).

Число работающих тепловых насосов в зарубежных странах составляет по разным оценкам от 15 до 17 млн шт. Ежегодно производится более 1,5 млн шт. тепловых насосов различных типов, а объем продаж составляет более 10 млрд долларов США. По прогнозам Мировой энергетической комиссии к 2020 году в передовых странах до 75 % нагрузки отопления и горячего водоснабжения будет покрываться с помощью



технологии тепловых насосов. Из-за значительной длительности отопительного сезона и как следствие больших отопительных нагрузок применение тепловых насосов в России более интенсивно, чем в западных странах, и имеет большие коэффициенты использования установленной мощности, что делает их применение в системах децентрализованного теплоснабжения более привлекательным. Однако в РФ преимущественно распространены централизованные системы теплоснабжения, и это определяет низкую эффективность использования тепловых насосов по стандартным схемам вследствие высоких температур теплоносителя, а также высокой эффективности комбинированной выработки в них тепловой и электрической энергии.

Наряду с преимуществами, такими, как снижение вредных выбросов, укрупнение оборудования, снижение стоимости системы, снижение себестоимости производства энергии, особенно при комбинированной выработке, реальное функционирование имеет ряд недостатков. Поскольку комплекс теплоснабжения, как правило, состоит из производителя, поставщика и потребителя тепловой энергии, то экономичность всего комплекса остается низкой: при достаточно эффективном производстве энергии ее распределение, передача и потребление еще требуют совершенствования. Большинство городов и поселков РФ отапливаются от местных котельных или ТЭЦ, работающих по графикам центрального качественного регулирования отпуска теплоты, рассчитанным по методикам 50-х годов прошлого века. Рост городов значительно увеличивает и количество потребителей тепло-

ты, подсоединенных к местной системе централизованного теплоснабжения. Новые же нагрузки покрываются за счет повышения мощностей источников теплоснабжения, как правило, без учета изменения характеристик тепловых сетей. Все это приводит к неоптимальному использованию топливных ресурсов и повышению стоимости энергии. Обеспечение качественного и энергоэффективного снабжения потребителей тепловой энергии является основной задачей местной системы централизованного теплоснабжения. В соответствии с действующими нормами температура воздуха в помещениях в холодный период года должна иметь определенное значение, не зависящее от погодных и временных условий. Однако повсеместно наблюдается недогрев или перегрев потребителей тепла. Эта проблема ненормативного отпуска присуща практически всем городам России с централизованным теплоснабжением. Анализ потребления тепловой энергии потребителями, оборудованными приборами учета тепловой энергии, в городе Чита Забайкальского края показал значительное отклонение реального теплопотребления от расчетных значений. К примеру, у 14-ти (из 81) объектов, финансируемых из городского бюджета, фактическое потребление превышает расчетное, причем отклонение (перетоп этих объектов) достигает до 40 %. Для остальных 67 объектов характерен недоотпуск тепловой энергии. При этом общий недоотпуск тепловой энергии на всех объектах составил более 22 % [1]. Усредненные статистические данные теплопотребления в течение отопительного периода данных объектов за последние 5 лет представлены в таблице.

Статистические данные по фактическому и расчетному теплопотреблению 81 ведомственных объектов (объекты комитета образования города Чита), оборудованных приборами учета тепловой энергии

Показатель теплопотребления	Статистические данные по показателям за отопительный сезон							
	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Всего
Фактическое потребление, МВт·ч	4876,5	7595,	11369,7	15936,3	14940,9	12573,2	9732,4	77025,1
Расчетное потребление (по графику отпуска тепла с ТЭЦ, МВт·ч)	5670,4	8347,1	15364,4	18748,6	15894,6	14287,7	10244,6	98313,4
Отношение фактического потребления к расчетному, %	86	91	74	85	94	88	94	87

Поддержание комфортных температурных условий в помещениях потребителей — первоочередная задача для систем теплоснабжения, но при общем недоотпуске тепловой энергии ее решение без внедрения современных технологий [2] не представляется возможным.

Современные методы оптимизации отпуска теплоты потребителям основаны на построении моделей функционирования системы распределения и потребления тепловой энергии. Наиболее полные из них предполагают следующее:

корректировка подаваемой от источника теплоты основана не на системе поправок температуры сетевой воды, а на теплогидравлическом расчете абонентских вводов с учетом схем присоединения установок ГВС; при этом реакция на любые возмущения осуществляется качественно-количественным регулированием;

нагрузка ГВС принимается в расчетах с учетом суточной неравномерности, определенной для различных групп потребителей, а проверка суточного баланса теплоты у потребителей и корректировка температурного графика в связи с изменением нагрузки ГВС предлагается не в качестве рекомендаций, а как одно из основных ограничительных условий суточного графика регулирования;

в модели производится расчет характеристик абонентов не только в конкретные моменты времени, но и осуществляется суточный анализ, при этом появляется возможность учитывать суточный перегрев абонентов и осуществлять регулирование параметров на источнике теплоснабжения с учетом суточной оптимизации;

помимо удовлетворения потребностей всех потребителей в модели появляется возможность оптимизировать суточный график отпуска теплоты на основе анализа всевозможных графиков, а в качестве критерия оптимальности принимаются затраты на ТЭЦ при заданной электрической нагрузке;

при оптимизации отпуска теплоты учитывается инерционность изменения параметров теплоносителя, а также аккумулирующая способность потребителей.

Произведенный на примере системы теплоснабжения микрорайона КСК (г. Чита Забайкальского края), отапливаемого от теплофикационных отборов двух турбин ПТ-60 Читинской ТЭЦ-1, расчет эффективности оптимизации отпуска теплоты от ТЭЦ потребителю при измене-

нии в течение суток нагрузки ГВС и температуры наружного воздуха, в котором моделировалась система с учетом ее реального состояния, показал экономический эффект 3 млн руб./год за счет снижения температуры обратной сетевой воды. При этом располагаемая тепловая мощность станции может быть увеличена на 6,1 % при сохранении расхода теплоносителя и пропускной способности тепловых сетей, а также выработки электрической энергии [3].

Данный экономический эффект не является предельным, поскольку диапазон температур прямой сетевой воды на ТЭЦ, в котором находится оптимальная, на конкретном временном промежутке ограничивается следующими обстоятельствами: разной протяженностью отдельных участков тепловых сетей; разными характеристиками тепловой изоляции участков тепловых сетей; ограничениями скорости изменения температуры прямой сетевой воды на ТЭЦ (не выше 30 °С/ч); тем, что районы теплоснабжения обладают разными потребителями тепловой энергии и, как следствие, требуют разного изменения температур прямой сетевой воды в течение суток [4, 5]. Снять эти ограничения позволит изменение температуры теплоносителя по лучам тепловых сетей. Такое изменение температуры согласно оптимизированным графикам центрального регулирования (в зависимости от оптимального суточного графика и потребностей конкретных потребителей) для каждого направления тепловых сетей позволит уменьшить перерасходы тепловой энергии, а также снизить температуру обратной сетевой воды и, как следствие, увеличить выработку на тепловом потреблении на ТЭЦ. Решением этой задачи может служить применение установок по перераспределению потоков теплоты по разноинерционным ветвям теплосетей в зависимости от оптимального суточного графика и потребностей конкретных потребителей. Перераспределение потоков теплоты предполагается осуществлять с применением технологии тепловых насосов по схеме, представленной на рис. 1 [6]. Метод перераспределения заключается в том, что от источника отпускается теплоноситель оптимальной температуры, при этом в период натопа в наиболее удаленных участках тепловых сетей температура увеличивается за счет нагрева в конденсаторе теплового насоса, а в период снижения тепловой нагрузки температура увеличивается в ближних участках тепловых сетей.



Рис. 1. Схема комплекса теплоснабжения

Рассмотрим пример управления и возможный экономический эффект от схемы, представленной на рис. 1. Введем ограничения, так как на данном этапе исследования необходимо принципиально оценить возможный эффект от предложенной схемы. Пусть два абонента постоянно снабжаются сетевой водой в количестве 400 кг/с и температурным графиком 104/60 °С. Теплоснабжение осуществляется от двух турбин ПТ 60—90. График потребления тепла абонентами представлен на рис. 2. Верхний график характеризует необходимое изменение температуры прямой сетевой воды, нижняя часть графика — температуру обратной сетевой воды.

При расчете температура прямой сетевой воды от станции в течение суток предполагалась постоянной, а температура обратной сетевой воды менялась в зависимости от потребности абонентов в тепле, которая характеризуется пиками и провалами на графике. При этом на станции после смешения потоков была усредненная температура обратной сетевой воды. При понижении температуры прямой сетевой воды на 4 градуса, т. е. до температуры 100 °С, и покрытии пиков тепловой нагрузки тепловым насосом за сутки на станции можно снизить потребление топлива на 31 тонну, а в год сэкономить 11354 т угля, что в денежном эквиваленте по хангорскому углю (768 р/т) составит 8,72 млн руб.

Известно, что эффективность теплового насоса выражает коэффициент преобразования энергии (КПЭ), равный отношению произведенной тепловой энергии к подведенной энергии (для рассматриваемого случая — электрической). Политика образования тарифов перераспределением затрат на электрическую и тепловую энергию говорит о том, что отношение тарифов электрической и тепловой энергии для различ-

ных регионов России чаще всего находится в пределах 1—2,4. То есть данная технология может вполне дополнять существующее централизованное теплоснабжение, где достигнут достаточно высокий (3—5) КПЭ. При этом чем больше разница двух отношений, тем меньше будет срок окупаемости проекта.

Следует, сравнивая теплоснабжение в европейских странах и России, учитывать, что помимо более суровых зим к особенностям российского теплоснабжения относится высокая расчетная температура теплоносителя в контуре системы отопления потребителя — 95/70 °С, тогда как на Западе температура значительно ниже. Западные и восточные производители тепловых

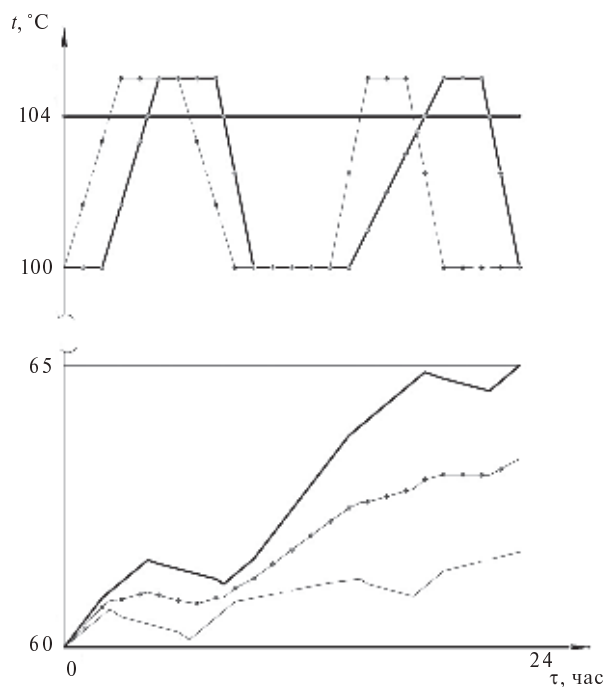


Рис. 2. График теплового потребления абонентов

насосов предлагают решения с низкой температурой нагрева теплоносителя, применять их в российских условиях практически невозможно, вернее, можно только при децентрализации системы отопления или децентрализации ГВС.

Для снижения эксплуатационных затрат на нагрев в качестве низкопотенциального источника теплоты могут быть использованы другие источники, к их числу можно отнести тепло грунта, воду различных источников, воздух, а также тепло солнечного излучения, воспринятое солнечными коллекторами. Оценка эффекта применения сторонних источников теплоты с учетом снижения эффекта от изменения температуры обратной сетевой воды показала увеличение экономической эффективности до 70 %. При этом на использование предложенной методики накладываются дополнительные ограничения за счет снижения температуры в испарителе. Кроме того, наблюдается снижение коэффициента преобразования теплоты.

Помимо использования тепловых насосов к технологиям, повышающим эффективность электронагрева, можно отнести применение электроразрядных технологий. Их использование выполняет двойную функцию (помимо нагрева данные установки обеспечивают обеззараживание воды при открытом водоразборе сетевой

воды для нужд ГВС), а потому обеспечивает дополнительную эффективность за счет сокращения распространения микроорганизмов.

Микроорганизмы, способствующие обрастанию внутренней поверхности трубопроводов в системах транспортирования воды, не только отрицательно влияют на ее качество, выделяя в нее продукты своей жизнедеятельности. Поселившись в кавернах разрушенных коррозией труб, они принимают активное участие в разрушительных коррозионных процессах. Разрушение металлических труб с участием бактерий идет во много раз быстрее, чем при электрохимическом коррозионном процессе. В некоторых случаях в результате биоэлектрохимической коррозии прободение труб происходит через 10–14 месяцев с начала эксплуатации. Обследование таких систем показало, что под слоем наростов, образованных железокислородными микроорганизмами, в зонах анаэробно-развивались сульфатредуцирующие и нитратредуцирующие бактерии. В процессе их жизнедеятельности образуется среда, которая способствует разрушению трубопроводов. Таким образом, происходит снижение санитарной надежности и эпидемической безопасности питьевого водопользования и системы горячего водоснабжения.

Возникновение инфекционных заболеваний напрямую зависит от санитарных мероприятий по очистке систем горячего и питьевого водоснабжения. Значительное количество потребителей горячего водоснабжения получают воду из открытых систем, а ряд потребителей — вообще из батарей отопления, поскольку проекты источников теплоснабжения не предусматривали нагрузку ГВС. В соответствии с СанПиН 2.1.4.2496–09 для систем централизованного теплоснабжения с открытым водоразбором качество воды должно соответствовать качеству питьевой воды. Для этого необходима разработка современных способов очистки и обеззараживания воды в системах централизованного теплоснабжения [7].

В течение многих лет в России и за рубежом проводятся работы по обеззараживанию жидкостей, которые основаны на применении высоковольтных разрядов в жидкости. К таким способам очистки стоит отнести диафрагменный разряд (ДЭР), в канале которого происходят различные процессы (кавитация, образование перекиси водорода, диффузия ионов металла с поверхности электродов). А при совмещении ДЭР

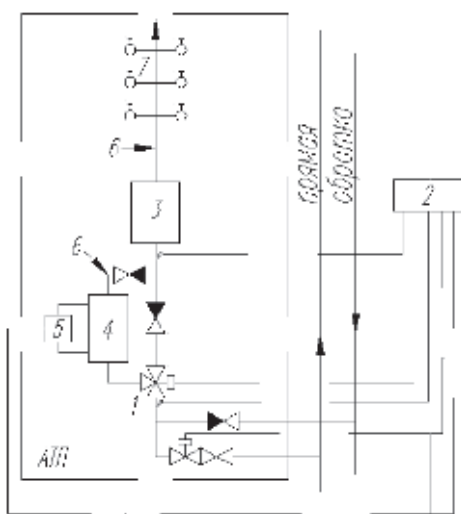


Рис. 3. Схема по обеззараживанию и очистке сетевой воды:

- 1 — регулирующий клапан с электроприводом;
- 2 — блок управления системой; 3 — бак-аккумулятор;
- 4 — разрядная камеры; 5 — источник питания разрядной камеры;
- 6 — место установки фильтра; 7 — потребители горячей воды

с применением цеолитсодержащих пород Забайкальских месторождений (запасы огромны — более 1600 млн т; стоимость — менее 8 руб. за кг) повышается суммарное воздействие всего этого, что благоприятно влияет на очистку воды от патогенных микроорганизмов, причем обработанная вода является раствором для обеззараживания.

Ряд экспериментов, проделанных в этом направлении, говорит о том, что обработанная вода, добавленная в нужном соотношении в зараженную, может полностью обеззаразить весь поток.

Малозатратные установки обеззараживания воды в открытых системах горячего водоснабжения у потребителей с использованием диафрагменного электрического разряда и применением цеолитсодержащих пород позволили бы убрать недостаток открытых систем по качеству воды.

Согласно СНиП [8] температура для централизованных систем горячего водоснабжения, присоединенных к открытым системам теплоснабжения, должна составлять 60–75 °С. Поэтому сетевая вода в АТП доводится в регулирующем клапане 1 до необходимой температуры и далее идет двумя потоками. Первый поток большей частью направляется в бак-аккумулятор 3, второй поток идет в разрядную камеру 4 для обеззараживания и после нее поступает в фильтр 6 с цеолитсодержащими породами. В зависимости от условий работы и химического состава исходной воды фильтр может устанавливаться либо до бака, либо после. В опытах использовался природный цеолит Шивиртуйского месторождения (фракция 1–3 мм, влажность до 16 %). После

фильтра обеззараженный раствор направляется в бак-аккумулятор, где происходит последующая обработка всего потока воды для нужд ГВС. Из бака вода поступает к потребителям 7. Для управления системой предусмотрен регулирующийся блок 2. Для контроля температуры воды установлено два датчика: перед регулирующим клапаном 1 и перед баком-аккумулятором 3.

Разрядная камера 1 представляет собой сосуд, разделенный по середине диафрагмой 2 с отверстиями 3 в ней. В каждой части сосуда находится по медному электроду 4. Вода для обработки 5 поступает в верхнюю область сосуда и через отверстия в диафрагме перетекает в нижнюю, где через патрубок 6 удаляется. В отверстиях диафрагмы между электродами создается ДЭР. Питание электродов происходит от сети переменного тока 220 В, 50 Гц с трансформатором 7, повышающим напряжение до 2 кВ, и регулятором 8. На входе и выходе разрядной камеры установлено по вентилю 9 для регулировки расхода жидкости.

Степень обеззараживания воды определяется по пробам, отобранным после фильтра, обычным бактериологическим анализом.

Неоднократные исследования, выполненные на данной установке, позволили установить зависимость ее бактерицидной активности от температуры воды. Данные эксперименты проводились при различном соотношении расходов бака-аккумулятора и разрядной камеры, а также при различных режимных факторах. Анализ полученных данных свидетельствует о том, что

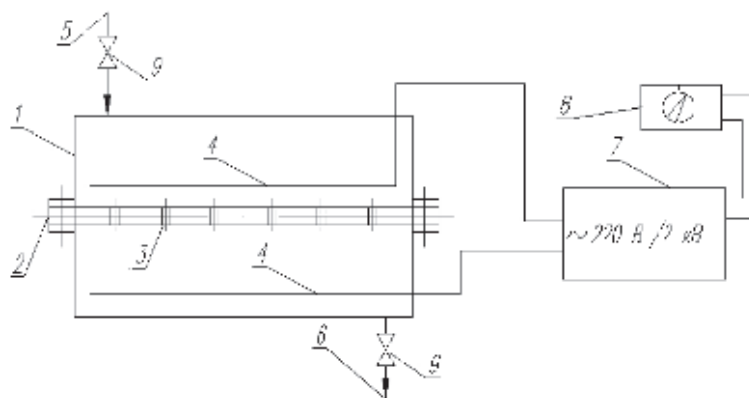


Рис. 4. Разрядная камера:

- 1 — корпус разрядной камеры; 2 — диэлектрическая диафрагма;
3 — отверстия; 4 — медные электроды; 5 — входной патрубок;
6 — выходной патрубок; 7 — повышающий трансформатор;
8 — регулятор; 9 — регулировочные вентили

с увеличением температуры исходной воды обеззараживающая способность увеличивается. Кроме того, помимо обеззараживания система производит догрев сетевой воды, что в свою очередь уменьшает расход из подающего трубопровода.

Очистка и обеззараживание воды для нужд горячего водоснабжения имеет свои особенности:

резко выраженную часовую неравномерность поступающих вод;

отсутствие потребления в ночные часы;

температуру воды горячего водоснабжения ($60\text{--}75\text{ }^{\circ}\text{C}$), близкую к оптимальной для обеззараживания, и, как следствие, повышение эффективности процессов;

необходимость размещения установки обеззараживания и очистки в отапливаемых зданиях.

Использование данной технологии позволяет в одной системе теплоснабжения совмещать схемы открытого и закрытого водоразбора для нужд ГВС, объединяя их достоинства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батухтин, А.Г. Применение оптимизационных моделей функционирования систем теплоснабжения для снижения себестоимости тепловой энергии и увеличения располагаемой мощности станции [Текст] / А.Г. Батухтин, В.В. Маккавеев // Промышленная энергетика. — 2010. № 2. — С. 7–8.

2. Батухтин, А.Г. Методы повышения эффективности функционирования современных систем транспортировки, распределения и потребления тепловой энергии [Текст] / А.Г. Батухтин, М.С. Басс, С.Г. Батухтин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2009. № 2. — С. 199–202.

3. Батухтин, А.Г. Методы повышения эффективности и увеличения располагаемой мощности систем централизованного теплоснабжения [Текст] / А.Г. Батухтин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2010. № 1. — С. 189–192.

4. Батухтин, А.Г. Влияние протяженности тепловых сетей на режимы отпуска теплоты от ТЭЦ с учетом функционирования потребителей [Текст]

/ А.Г. Батухтин, О.Е. Куприянов // Промышленная энергетика. — 2005. № 5. — С. 39–41.

5. Goryachikh, N.V. Some Methods for Making Cogeneration Stations More Maneuverable [Текст] / N.V. Goryachikh, A.G. Batukhtin, S.A. Ivanov // Thermal Engineering. — 2010. Vol. 57. № 10. — P. 892–896.

6. Батухтин, А.Г. Использование тепловых насосов для повышения тепловой мощности и эффективности существующих систем централизованного теплоснабжения [Текст] / А.Г. Батухтин // Научно-технические ведомости СПбГТУ. — 2010. № 2. — С. 28–33.

7. Батухтин, А.Г. Обеззараживание воды в системах централизованного теплоснабжения [Текст] / А.Г. Батухтин, В.В. Петин, И.Ф. Суворов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2010. № 1. — С. 209–212.

8. Строительные нормы и правила. СНиП 2.04.01–85. Внутренний трубопровод и канализация зданий [Текст] / Госстрой России. — М., 1998. — 60 с.

УДК 62-83:621.333.01

М.А. Андреев, А.М. Водовозов

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО ПЕРЕХОДНЫМ ПРОЦЕССАМ В СИЛОВОЙ ЦЕПИ

Стремление создать высококачественный асинхронный электропривод без использования информационных датчиков, монтируемых на валу или встраиваемых непосредственно в двигатель, привело к распространению бездатчиковых асинхронных электроприводов с векторным управлением. Диапазон регулирования скоро-

сти (вверх и вниз от номинальной) у таких электроприводов, как правило, не превышает 100 [1], поскольку на низких скоростях бездатчиковый электропривод чувствителен к изменениям параметров электромеханического преобразователя. Преимущественно это относится к температурному дрейфу активных сопротивлений



статорных и роторных обмоток двигателя: в номинальных условиях функционирования электропривода возможно увеличение значений активных сопротивлений двигателя на 50 % относительно их значений, полученных в холодном состоянии [1].

Параметрическая адаптация электропривода, осуществляемая в режиме реального времени, является одним из способов разрешения данной проблемы. Закрытость программно-алгоритмического обеспечения и идентификационных моделей, реализованных зарубежными производителями в серийно выпускаемых преобразователях частоты, где вмешательство пользователя в базовые алгоритмы управления и идентификации электропривода практически исключено, ставит перед отечественными производителями актуальную задачу поиска новых путей идентификации параметров асинхронного двигателя в рабочих режимах при его питании от преобразователя частоты.

Теоретическое обоснование

Изменение активного сопротивления статора асинхронного двигателя ощутимо сказывается на статических и динамических характеристиках электропривода. В наибольшей степени это заметно в области малых скоростей движения, где возможна полная потеря работоспособности электропривода. Изменение активного сопротивления обмотки ротора оказывает меньшее влияние на качество работы привода. Использование алгоритмов адаптации, учитывающих изменение сопротивлений, позволяет снизить чувствительность к изменению активных сопротивлений в процессе работы, расширить диапазон регулирования скорости как вниз, так и вверх от номинальной, снизить уровень пульсаций переменных на малых скоростях [1].

Для идентификации параметров машины были проанализированы переходные режимы тока фазы статора асинхронного двигателя на малых интервалах времени [2].

В качестве базовой математической модели для рассматриваемого случая принята модель асинхронного двигателя в неподвижной относительно статора системе координат; в ней механическая составляющая характеризуется приведенными к валу двигателя моментом инерции и моментом сопротивления:

$$\begin{cases} u_s(t) = R_s i_s(t) + L_s \frac{di_s(t)}{dt} + L_m \frac{di_r(t)}{dt}; \\ 0 = R_r i_r(t) + L_m \frac{di_s(t)}{dt} + L_r \frac{di_r(t)}{dt} - \\ - j\omega(t) L_m i_s(t) - j\omega(t) L_r i_r(t); \\ J(t) \frac{d\omega(t)}{dt} \frac{1}{p_\tau} = \frac{3}{2} p_\tau L_m I_m (\bar{i}_s(t) i_r(t)) - M_c(t), \end{cases} \quad (1)$$

где R_s, R_r — сопротивления обмоток статора и ротора; L_s, L_r, L_m — индуктивности обмоток статора, ротора и шунта намагничивания, p_τ — число пар полюсов; $J(t)$ — момент инерции; $M_c(t)$ — момент сопротивления; $u_s(t)$ — напряжение питания; $i_s(t), i_r(t)$ — токи статора и ротора.

На интервалах коммутации скорость вращения вала изменяется незначительно $\omega(t) = \omega = \text{const}$, поэтому третье уравнение системы (1) исключается из рассмотрения. Если из первых двух уравнений исключить ненаблюдаемую переменную состояния $i_r(t)$, осуществить разложение по ортогональным осям (α, β) и выполнить ряд промежуточных математических операций, позволяющих применить преобразование Лапласа, то система принимает вид

$$\begin{bmatrix} W_{11}(p) & W_{12}(p) \\ W_{21}(p) & W_{22}(p) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{s\alpha}(p) \\ I_{s\beta}(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1(p) \\ U_2(p) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где p — оператор Лапласа;

$$W_{11}(p) = \frac{1}{L_m} (R_r + L_r p) (R_s + L_s p) - L_m p^2;$$

$$W_{12}(p) = -\omega L_m p + \omega \frac{L_r}{L_m} (R_s + L_s p);$$

$$W_{21}(p) = \omega L_m p - \omega \frac{L_r}{L_m} (R_s + L_s p);$$

$$W_{22}(p) = \frac{1}{L_m} (R_r + L_r p) (R_s + L_s p) - L_m p^2;$$

$$U_1(p) = \frac{R_r}{L_m} U_{s\alpha}(p) + \frac{L_r}{L_m} p U_{s\alpha}(p) + \omega \frac{L_r}{L_m} U_{s\beta}(p);$$

$$U_2(p) = \frac{R_r}{L_m} U_{s\beta}(p) + \frac{L_r}{L_m} p U_{s\beta}(p) - \omega \frac{L_r}{L_m} U_{s\alpha}(p).$$

Согласно теореме Крамера в операторном виде токи можно описать следующими формулами:

$$\begin{aligned} I_{s\alpha}(p) &= \frac{-W_{21}(p)}{D(p)} U_1(p) + \frac{W_{11}(p)}{D(p)} U_2(p); \\ I_{s\beta}(p) &= \frac{W_{22}(p)}{D(p)} U_1(p) - \frac{W_{12}(p)}{D(p)} U_2(p); \\ D(p) &= W_{11}(p)W_{22}(p) - W_{12}(p)W_{21}(p). \end{aligned} \quad (3)$$

Форма токов на интервалах коммутации не позволяет определить более одной постоянной времени ввиду недостатка информации для их выявления. Поэтому в качестве модели выбраны передаточные функции первого порядка

$$\begin{aligned} I_{s\alpha\mu}(p) &= \frac{K_1 U_2 + K_2 U_1}{p(Tp + 1)}; \\ I_{s\beta\mu}(p) &= \frac{-K_2 U_2 + K_1 U_1}{p(Tp + 1)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{R_r R_s L_m}{(R_r R_s)^2 + (\omega L_r R_s)^2}; \quad K_2 = \frac{\omega L_r R_s L_m}{(R_r R_s)^2 + (\omega L_r R_s)^2}; \\ T &= \frac{2 R_r R_s (L_r R_s + L_s R_r) - 2 \omega^2 L_r R_s (L_m^2 - L_r L_s)}{(R_r R_s)^2 + (\omega L_r R_s)^2}. \end{aligned}$$

Далее рассматриваются только выражения для оси a , так как для оси b преобразования аналогичны, но за тем исключением, что в качестве коэффициента передачи K принимается значе-

ние K_2 . Здесь K и T — коэффициент передачи и постоянная времени цепи статора электродвигателя, которые могут быть определены в реальном времени на основе анализа экспериментальной «трубки» тока, показанной на рис. 1.

По изменению постоянной времени T в процессе работы может быть однозначно оценено изменение активных сопротивлений электропривода в зависимости от температуры. Задача определения постоянной времени сводится к решению неоднородного линейного дифференциального уравнения для цепи постоянного тока при известных напряжении, двух отсчетах времени (длительность межкоммутационного интервала) и значениях тока в начале и конце межкоммутационного интервала. Для решения неоднородной задачи применен метод вариации постоянной с учетом неизменности напряжения на интервале коммутации.

Решением уравнения является выражение

$$T = \frac{t}{\ln \left(\frac{I_0 - KU}{I(t) - KU} \right)},$$

где t — длительность межкоммутационного интервала; I_0 — величина тока в начале межкоммутационного интервала; $I(t)$ — величина тока в конце межкоммутационного интервала; U — величина постоянного напряжения на межкоммутационном интервале. Значение коэффициента

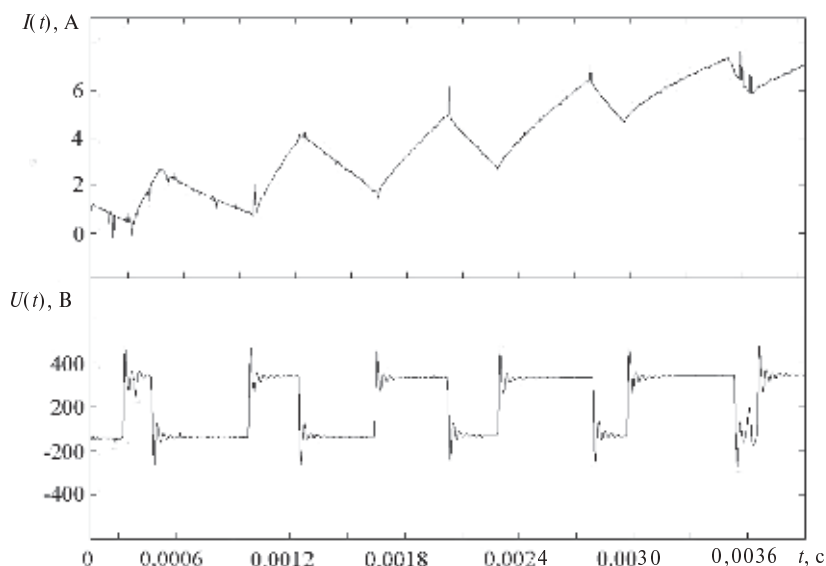


Рис. 1. Экспериментальная «трубка» тока

K вычисляется по установившимся значениям тока $I_{уст}$ и напряжения $U_{уст}$: $K = I_{уст} / U_{уст}$.

Решение линейного неоднородного дифференциального уравнения позволяет определять эквивалентную постоянную времени только в случае отсутствия в кривой тока временных разрывов. «Трубка» тока, изображенная на рис. 1, представляет собой разрывную во времени кусочно-экспоненциальную функцию. Для получения достоверных результатов предлагается использовать процедуру сплайсинга (рис. 2), предполагающего исключение из рассмотрения интервалов времени, на которых значение тока уменьшается. Если принимать во внимание только те участки, на которых ключи, обеспечивающие нарастающий ток фазы, открыты, то суть процедуры состоит в нахождении на соседних участках экспонент одинаковых значений нарастающего тока. Интервалы между временными отметками, где токи на соседних участках одинаковы, вырезаются. Таким образом, восстанавливается непрерывная экспоненциальная функция, необходимая для определения постоянной времени T . По изменению постоянной времени T контура тока в процессе работы может быть однозначно оценено изменение активных сопротивлений электропривода в функции температуры.

На основании проведенных исследований разработан алгоритм идентификации активных сопротивлений статора и ротора асинхронного двигателя, предусматривающий как проведение процедур в процессе включения электропривода, так и расчеты в реальном времени на основе анализа переходных процессов статорной цепи.

Экспериментальное подтверждение

Для подтверждения справедливости предложенного метода параметрической идентификации проведен ряд экспериментов на исследовательском комплексе, внешний вид и структура которого изображены на рис. 3.

Преобразователь частоты (ПЧ) фирмы Omron типа Varispeed F7 используется для регулирования скорости вращения асинхронного электродвигателя (АД) с короткозамкнутым ротором. На персональном компьютере (ПК) установлено программное обеспечение CX-Drive, необходимое для управления преобразователем частоты. На валу двигателя смонтирован электропорошковый тормоз (ЭПТ), выполняющий функцию нагрузочного агрегата и позволяющий создавать пассивный тормозной момент. Система управления тормозом (СУТ) дает возможность регулировать тормозной момент как вручную, так и автоматически при помощи ПК. На другом конце вала смонтирован импульсный датчик скорости (ИДС). Компьютерная система анализа электрических сигналов состоит из двух частей. Первая часть представляет собой блок быстродействующих высокоточных датчиков (БД) тока и напряжения. БД преобразует измеряемые величины в нормированные сигналы для платы сбора информации фирмы L-Card. Вторая часть — непосредственно сама плата L-Card, которая оцифровывает и передает полученные данные в компьютер. Функциональные возможности обеспечивают испытание электропривода в статических и динамических режимах работы. Максимальные погрешности измерений с уче-

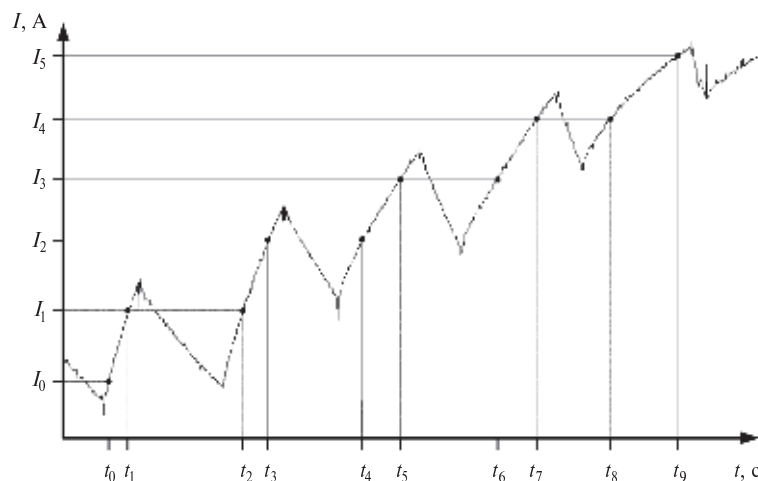


Рис. 2. Процедура сплайсинга кусочно-экспоненциальной функции

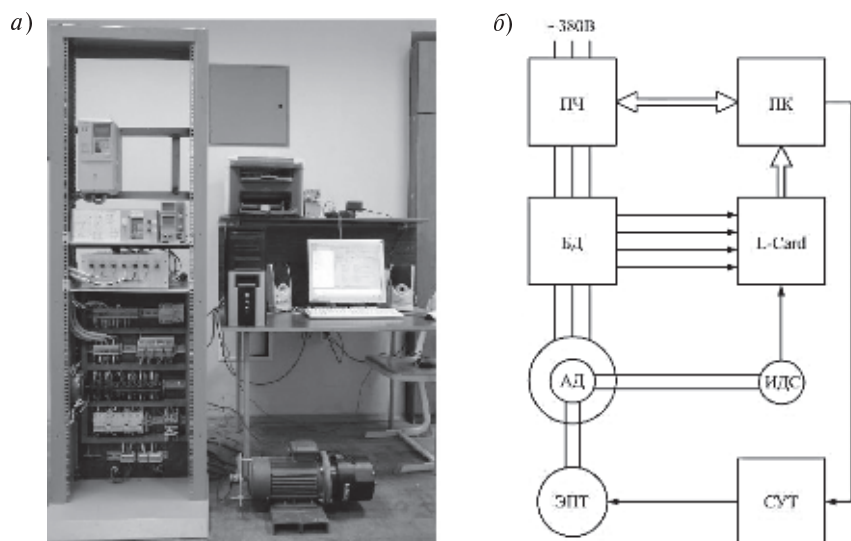


Рис. 3. Внешний вид (а) и структура (б) исследовательского комплекса

том показателей точности всех элементов комплекса не превышают 2 %.

Результаты исследований

Проведенные исследования доказали возможность решения задачи идентификации активных сопротивлений асинхронного двигателя, питаемого от преобразователя частоты, в режиме реального времени на основании анализа переходных процессов в цепи статора. Предложенный метод иден-

тификации параметров асинхронного электропривода на межкоммутационных интервалах силовых ключей автономного инвертора позволяет на низких скоростях вращения вала в реальном времени определять параметры машины с погрешностью не более 5 %. Использование предлагаемого метода в алгоритмах адаптации бездатчикового асинхронного электропривода открывает реальную возможность расширения диапазона регулирования частоты вращения в сторону низких скоростей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Виноградов А.Б.** Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ [Текст] / А.Б. Виноградов, И.Ю. Колодин, А.Н. Сибицев // Силовая электроника.— 2006. № 3.— С. 47–51.
2. **Андреев М.А.** Идентификация параметров асинхронного электропривода на интервалах коммутации силовых ключей автономного инвертора [Текст] / М.А. Андреев // Системы управления и информационные технологии.— 2009. № 3(37).— С. 68–71.

УДК 620.92+624.042 (075.8)

С.В. Светозарская, Л.И. Кубышкин

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Разрабатываемая в настоящее время концепция проектирования объектов возобновляемой энергетики предусматривает автоматизацию работы проектировщика как на этапе создания

твердотельных трехмерных моделей объекта, так и на этапе выпуска графических проектных документов — чертежей [1]. Графические системы, ориентированные на такие отрасли, как маши-



ностроение и промышленно-гражданское строительство, имеют библиотеки стандартных компонентов и унифицированных конструкций, которые упрощают процесс создания и многократного использования готовых элементов моделируемого объекта, что дает возможность автоматизировать работу над трехмерной твердотельной моделью проектируемого объекта. Отсутствие же такого информационного обеспечения не позволяет автоматизировать этот наиболее ответственный и трудоемкий этап новой технологии проектирования объектов возобновляемой энергетики. Все сказанное определяет актуальность рассматриваемого вопроса и необходимость разработки библиотек параметрических моделей конструктивных компонентов оборудования и сооружений установок возобновляемой энергетики.

Идея использования параметрических моделей появилась еще на ранних этапах развития систем автоматизированного проектирования [2], но долгое время не могла быть осуществлена по причине недостаточной производительности компьютеров. В настоящее время параметрическое моделирование широко используется при проектировании зданий и сооружений, механического и электротехнического оборудования, транспортных средств и т. д.

Параметрическое моделирование существенно отличается от обычного трехмерного. Конструктор создает математическую модель объекта с параметрами, при задании которых происходят изменение размеров деталей объекта и их взаиморасположение. Таким образом, ранее разработанные и сохраненные в библиотеке модели конструктивных компонентов объектов возобновляемой энергетики могут быть использованы в соответствии с требованиями к новому проектируемому объекту.

Применение параметрического моделирования, ориентированного на установки возобновляемой энергетики, должно быть направлено на автоматизацию проектирования с целью сокращения его сроков и повышения качества и предусматривать создание библиотек параметрических моделей конструктивных компонентов, разработку их математических моделей и программного обеспечения для проведения требуемых расчетов.

В статье на примере проекта гидроэнергетического объекта — гидроаккумулирующей элек-

тростанции (ГАЭС) — предлагается решение ряда вопросов, в числе которых:

- разработка методики и выбор программных пакетов для создания параметрических моделей конструктивных компонентов создания;

- математическое описание этих моделей;

- разработка специального программного обеспечения для реализации расчетов базовых и зависимых от них параметров;

- создание библиотеки параметрических моделей конструктивных компонентов основного оборудования и сооружений установок возобновляемой энергетики.

Выбор графических пакетов для реализации методики параметрического моделирования компонентов гидроэнергетических объектов

Анализ возможностей технического и программного обеспечения инженерной компьютерной графики, используемого сегодня в проектных и научно-исследовательских организациях гидроэнергетического профиля (ОАО «Ленгидропроект», ОАО «СГЭМ», ОАО «РусГидро», ЗАО «МНТО ИНСЭТ») и в учебном процессе [3], показывает, что моделирование объектов возобновляемой энергетики следует выполнять в интегрированной среде AutoCAD Civil 3D + Autodesk Inventor + 3ds Max [4]. Эти графические пакеты освоены и широко используются в вышеуказанных проектных, научно-исследовательских организациях и учебном процессе подготовки специалистов высших учебных заведений.

Графический пакет AutoCAD Civil 3D, ориентированный на технологию информационного моделирования, — один из наиболее распространенных и функциональных программных продуктов для моделирования природной среды, транспортных сетей, землеустройства и природоохранных сооружений. В программе имеются средства для анализа картографических данных, расчета ливневых стоков, определения объемов земляных работ, визуального анализа прямой видимости, включая точные расстояния видимости и т. д.

Применительно к моделированию гидроэнергетических объектов (ГЭО) AutoCAD Civil 3D может быть использован для создания модели природных условий, в которых будет размещен гидроузел [2]. В созданную модель включаются необходимые изменения, производимые

в результате возведения гидроузла: расчистка местности, размещение сооружений и транспортных сетей и т. д. Кроме того, в данном графическом пакете могут быть созданы такие компоненты ГЭО, как, например, плотины и дамбы.

Модели, создаваемые в графическом пакете AutoCAD Civil 3D, представляют собой поверхность на основе нерегулярной триангуляционной сети. Такие поверхности не являются параметрическими. Тем не менее широкие функциональные возможности программы позволяют управлять полученной моделью, например изменять уклон созданных выемок и насыпей, менять трассу автодорог и т. д., что делает модель достаточно «гибкой» и дает возможность ее использования при параметрическом моделировании.

В качестве среды для создания трехмерных параметрических моделей оборудования и сооружений ГЭО может быть использован графический пакет Autodesk Inventor [5]. Особенность этого графического пакета — применение управляющих размеров, что и определяет возможность его использования в качестве среды для создания библиотечных параметрических конструктивных компонентов ГЭО. Кроме того, функциональные возможности Autodesk Inventor позволяют производить математические операции (задание размеров в виде формул), а также использовать адаптивную технологию моделирования при помощи наложения зависимостей, что упрощает не только математическое описание модели, но и управление моделью пользователем. Немаловажное значение при моделировании компонентов ГЭО имеет возможность задания размеров при помощи внешних таблиц MS Excel. Необходимость использования таких таблиц обусловлена сложностью математических зависимостей, описывающих некоторые конструктивные компоненты ГЭО. Например, внешние таблицы используются для реализации сложных математических расчетов с использованием логических операций (расчет повышения давления в трубопроводе при гидравлическом ударе для определения экономически наиболее выгодного диаметра трубопровода, расчет диаметра рабочего колеса и т. д.).

Одно из преимуществ использования графического пакета Autodesk Inventor — автоматизация создания проектной документации, прежде всего чертежей. Чертежи в среде Inventor созда-

ются на основе построенных трехмерных моделей (детали и сборки) и представляют собой набор проекций, видов, разрезов, узлов объекта. На рис. 1 приведены примеры чертежей и плакатов, полученных на основе сборок ГАЭС шахтного типа и проточного тракта ГАЭС, а также чертежи отдельных деталей.

Создаваемый чертеж отображает текущее состояние модели. При внесении изменений в модель они автоматически отображаются на всех чертежах, полученных на ее основе, что исключает возможность возникновения несогласованных чертежей.

Последний этап создания трехмерной модели ГЭО — визуализация — может быть осуществлен в пакете 3ds Max.

Разработка математического описания конструктивных компонентов основного оборудования ГЭО

Следующий этап разработки методики параметрического моделирования конструктивных компонентов ГЭО — создание математического описания моделей, т. е. выбор их базовых параметров и определение математических зависимостей, по которым будет осуществляться управление размерами модели посредством этих параметров.

Ниже приведено математическое описание некоторых конструктивных компонентов оборудования и сооружений ГЭО, используемых для создания трехмерной параметрической модели ГАЭС.

Рабочее колесо обратимой гидротурбины. В качестве базового параметра, управляющего размерами модели рабочего колеса обратимой гидротурбины, был выбран его диаметр D_1 , величина которого может быть определена исходя из приведенных ниже зависимостей [6].

Диаметр рабочего колеса насоса-турбины определяется по формуле

$$D_1 = \frac{n'_{I_{\text{н опт}}} \sqrt{H_{\text{н}}}}{n}.$$

Здесь $n'_{I_{\text{н опт}}}$ — приведенная частота вращения насоса-турбины при максимальном КПД; $H_{\text{н}}$ — средний напор гидротурбины, соответствующий оптимуму универсальной характеристики при работе турбины в насосном режиме; n — нормальная частота вращения гидротурбины в на-

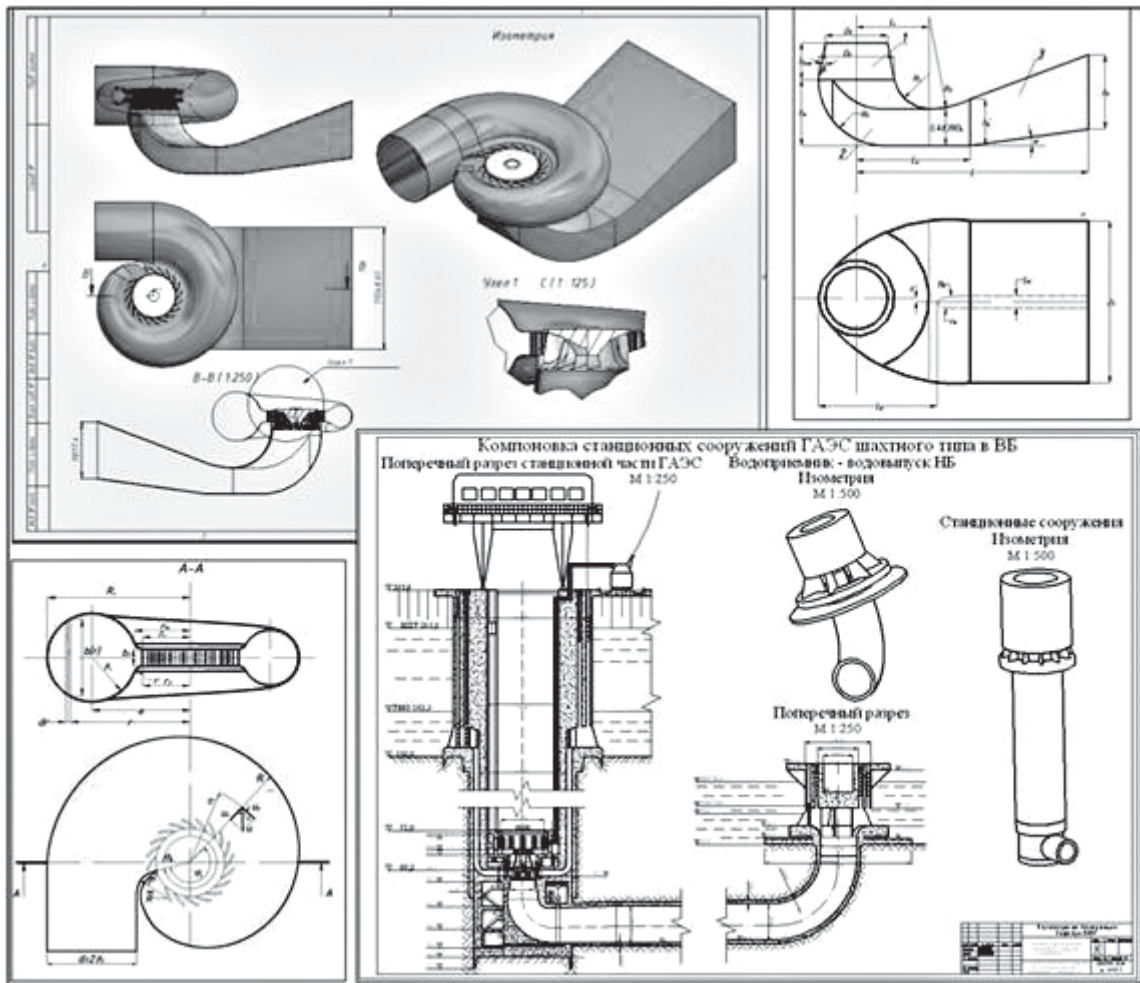


Рис. 1. Примеры оформления проектной документации в виде чертежей и плакатов, полученных в среде Autodesk Inventor на основе сборок и отдельных деталей параметрических моделей элементов

сосном и турбинном режимах, определяемая при помощи выражения

$$n = \frac{n_{SH} H^{3/4}}{3,65 \sqrt{Q_H}},$$

где Q_H — расход воды, соответствующий среднему напору в двигательном режиме работы; n_{SH} — коэффициент быстроходности гидротурбины при ее работе в насосном режиме, определяемый по формуле

$$n_{SH} = 3,65 \frac{n \sqrt{Q_H}}{H^{3/4}} = 3,65 n'_{I_{\text{н опт}}} \sqrt{Q'_{I_{\text{н опт}}}};$$

$Q_{I_{\text{н опт}}}$ — приведенный расход турбины в насосном режиме, соответствующий максимальному КПД.

Приведенная частота вращения насоса-турбины и расход при максимальном КПД могут быть определены по таблицам систематизированных данных [6].

Конструктивные компоненты гидротурбины: спиральная камера, колонны статора, отсасывающая труба. Создание параметрических моделей таких конструктивных компонентов гидротурбины как спиральные камеры, колонны статора и отсасывающие трубы наиболее целесообразно проводить по существующим отраслевым стандартам [7], которые устанавливают относительные размеры очертаний рассматриваемых элементов. Использование таких стандартов позволяет исключить использование внешних таблиц MS Excel.

Гидрогенератор. Базовые параметры обратимого гидрогенератора — диаметр его ротора

и высота активной стали. Параметры гидрогенератора определяются в соответствии с рекомендациями, данными в работе [8]. Диаметр ротора гидрогенератора D_i — согласно выражению

$$D_i = \frac{\tau^* 2p}{\pi},$$

где $2p$ — число пар полюсов генератора; τ^* — длина внешней дуги обода ротора, приходящаяся на один полюс; S^* — удельная нагрузка, приходящаяся на один полюс.

Высота активной стали вычисляется по формуле

$$l_a = \frac{30 C_a S_p}{\pi n_c D_i^2},$$

где C_a — коэффициент машины, зависящий от удельной нагрузки на полюс S^* ; S_p — расчетная мощность; n_c — синхронная частота вращения.

Математические зависимости, определяющие остальные размеры гидрогенератора, даны в табл. 1.

Стальной трубопровод. Базовым параметром модели трубопровода ГЭС и ГАЭС служит его диаметр. Экономически наиболее выгодный диаметр трубопровода рассчитывается по зависимостям [9] на участках с небольшими напорами ($H \leq 30$ м) по формуле

$$D_{\text{ЭК}} = \sqrt[6]{\frac{Q_p^3 T_p S^3 \eta_a \beta}{\delta c_{\text{тр}}}},$$

для участков с большими напорами ($H > 30$ м) экономически наиболее выгодный диаметр находится по зависимости

$$D_{\text{ЭК}} = \sqrt[7]{\frac{Q_p^3 T_p S^3 \eta_a \beta R}{10 c_{\text{тр}} H}},$$

где Q_p — расчетный среднекубический расход, м³/с; T_p — расчетное время работы трубопровода, ч; S^3 — стоимость 1 кВт·ч заменяемой электроэнергии, руб./кВт·ч; η_a — средний КПД гидроагрегата, $\eta_a = 0,85-0,90$; β — коэффициент, учитывающий потери энергии в период паводка из-за снижения напора, соответствует пропускной способности турбин, $\beta = 1,00-1,15$; R — расчетное сопротивление материала трубопровода, кг/см²; δ — толщина оболочки трубопровода, см; $c_{\text{тр}}$ — стоимость 1 т материала трубопровода, его монтажа и окраски, руб.; H — напор в середине участка с учетом гидравлического удара, м.

Толщина оболочки трубопровода определяется по «котельной» формуле

$$\delta \geq \frac{5HD}{R},$$

где δ — толщина оболочки трубопровода, см; H — расчетный напор, м; D — диаметр срединной поверхности цилиндрического трубопровода, м; R — расчетное сопротивление материала, кг/см².

Расчет экономически наиболее выгодного диаметра трубопровода должен производиться с учетом повышения давления при гидравлическом ударе, величина которого определяется по «цепным» уравнениям [2]:

для конца первой фазы

$$q_1 \sqrt{1 + z_1} = q_0 - \frac{z_1}{\zeta};$$

Таблица 1

Определение геометрических параметров гидрогенераторов

Элемент генератора	Параметр	Формула
Статор	Высота корпуса, $h_{\text{ст}}$, м	$1,8 \cdot l_a$
	Диаметр корпуса, $D_{\text{ст}}$, м	$(1,05 + 0,0017n_c) D_i$
Верхняя крестовина	Высота, $h_{\text{вк}}$, м	$(0,1-0,12) D_i$
	Диаметр лучей, $D_{\text{вк}}$, м	$D_{\text{ст}}$
Подпятник	Высота, $h_{\text{п}}$, м	$(0,15-0,2) D_i$
	Диаметр кожуха $D_{\text{п}}$, м	$(0,4-0,5) D_i$
Шахта	Диаметр шахты, $D_{\text{ш}}$, м	$D_i - 0,5$
Надстройка	Диаметр D_0 , м	$(0,3-0,5) D_i$
	Высота h_0 , м	$(0,3-0,4)$ м
Кратер	Диаметр $D_{\text{кр}}$, м	$(1,4-1,5) D_i$



для конца фазы n :

$$q_n \sqrt{1 + z_n} = q_0 - \frac{zn}{\zeta} - \frac{2}{\zeta} \sum_{i=1}^{i=n-1} z_i,$$

где q_0 — величина начального относительного приведенного расхода воды; q_1 — величина относительного приведенного расхода в конце первой фазы гидравлического удара; q_n — то же в конце фазы n ; z_1, z_i, z_n — относительное повышение напора соответственно для конца фаз 1, i , n ; ζ — первая характеристика эквивалентного трубопровода.

Относительное повышение давления в конце трубопровода при сбросе малых нагрузок рассчитывается по зависимостям

$$z_{np} = \zeta q_0 \text{ при } 0 \leq q_0 \leq q_{кр};$$

$$z_1 = \frac{2\sigma}{1 + 0,5\zeta q_0 - \sigma} \text{ при } q_{кр} < q_0 < \frac{2}{\zeta};$$

$$z_m = \frac{2\sigma}{2 - \sigma} \text{ при } \frac{2}{\zeta} \leq q_0 \leq 1,$$

где σ — вторая характеристика эквивалентного трубопровода; $q_{кр}$ — критическая величина начального относительного приведенного расхода.

Разработка специального программного обеспечения для реализации расчетов базовых и зависимых от них параметров

Поскольку средства графического пакета Autodesk Inventor не предоставляют возможности проведения расчетов, необходимых для определения диаметра рабочего колеса D_1 и экономически наиболее выгодного диаметра трубопровода $D_{эк}$, для таких расчетов на базе MS Excel были созданы специальные программы, связанные с графическим пакетом Autodesk Inventor.

Программа расчета диаметра рабочего колеса насоса-турбины. В качестве исходных данных для программного расчета диаметра рабочего колеса обратимой гидротурбины были выбраны: тип, расчетный напор, расчетный расход насоса-турбины. При задании исходной информации в автоматическом режиме из таблицы систематизированных данных [6] выбираются соответствующие заданному напору приведенная частота вращения $n'_{I_{н\text{опт}}}$ и приведенный расход насоса-турбины при максимальном КПД $Q_{I_{н\text{опт}}}$. По полученным данным рассчитывается коэффициент быстроходности n_{SH} и частота

вращения гидротурбины n . Далее автоматически выбирается ближайшая синхронная частота вращения и рассчитывается диаметр рабочего колеса насоса-турбины D_1 .

Завершающий этап автоматического расчета — формирование таблицы параметрических размеров геометрической модели, которая представляет массив связанных между собой кодов размеров, используемых при создании модели, и их значений, вычисленных в соответствии с заданными коэффициентами. Эта таблица связана с таблицей параметров Autodesk Inventor, данные которой управляют геометрией модели (рис. 2).

Программа для расчета экономически наиболее выгодного диаметра стального трубопровода с учетом гидравлического удара. В первом приближении выбор экономически наиболее выгодного диаметра $D_{эк}$ осуществляется исходя из предположения, что величина гидравлического удара составляет максимально допустимое значение, равное 30 % статического напора. При задании исходных данных в программе, разработанной на базе MS Excel, в зависимости от напора на середине участка (напор больше либо меньше 30 м) производится автоматический расчет экономически наиболее выгодного диаметра трубопровода $D_{эк}$, а также других значений, необходимых для проведения расчета. После определения $D_{эк}$ автоматически вычисляется необходимая толщина оболочки δ . Полученные значения сравниваются с таблицей нормального ряда трубопроводов. В качестве искомым значений принимаются наиболее близкий стандартный диаметр и наибольшая из расчетного и соответствующего минимального значения толщина оболочки δ .

Полученная величина экономически наиболее выгодного диаметра может быть уточнена после вычисления величины гидравлического удара, что осуществляется также при помощи разработанной программы, в которой производится расчет характеристик эквивалентного трубопровода и затем определяется относительное повышение давления в конце трубопровода при сбросе полной нагрузки и частичной нагрузки.

Создание библиотеки параметрических моделей конструктивных компонентов основного оборудования и сооружений ГЭО

На базе представленного выше математического описания по методике параметрического моделирования в графической среде Autodesk

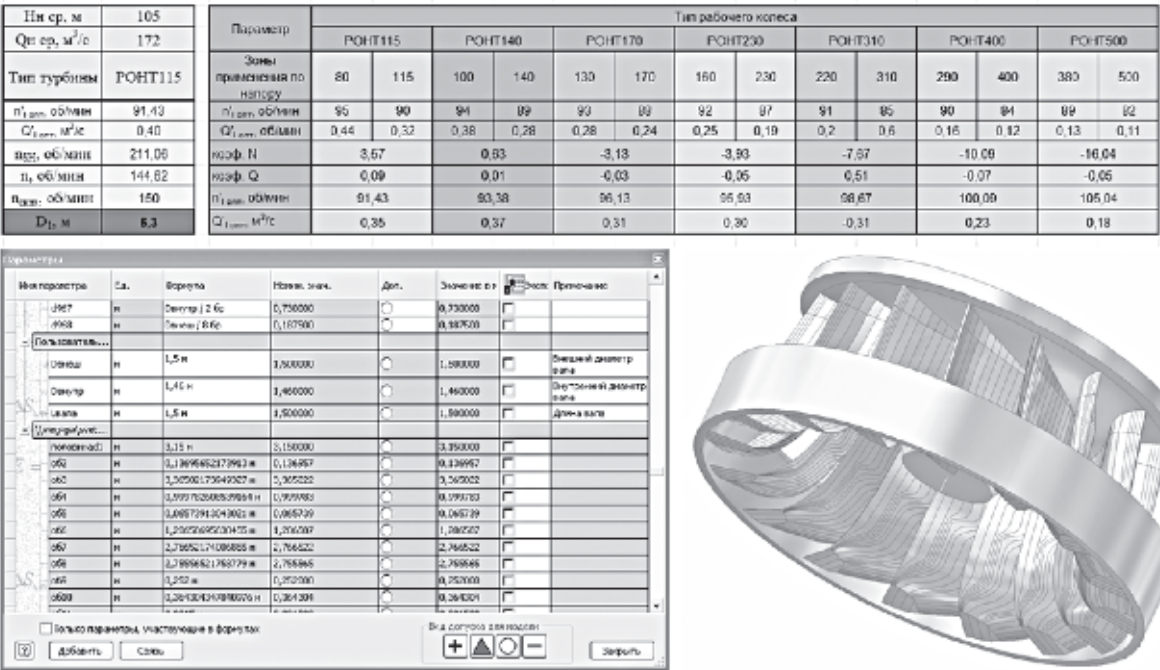


Рис. 2. Внешние таблицы MS Excel, таблица параметров модели Autodesk Inventor и геометрическая модель рабочего колеса

Inventor были созданы и включены в соответствующие библиотеки геометрические модели основного оборудования и водопроводящего тракта ГЭО (табл. 2).

Обозначения, принятые в табл. 2: D_1 — диаметр рабочего колеса; D_g — диаметр ротора генератора; D_k — диаметр входного сечения колена отсасывающей трубы; $D_{эк}$ — экономически наимыгоднейший диаметр трубопровода; $L_{ст}$ — длина профиля колонн статора; l_a — высота активной стали гидрогенератора; ε — эксцентриситет

колена отсасывающей трубы; h — высота отсасывающей трубы; α — угол наклона основания выходного диффузора; δ — толщина оболочки трубопровода.

Апробация предложенных этапов моделирования была выполнена применительно к основным сооружениям Ленинградской ГАЭС с использованием параметрических компонентов, представленных в табл. 2. Для этого из созданных библиотек унифицированных компонентов были выбраны соответствующие модели требуемых

Таблица 2

Компоненты модели основного оборудования ГЭО				
Наименование компонента			Базовые параметры	
Рабочее колесо			D_1	
РО	ПЛ	Рабочие колеса обратимых машин		
Стальной трубопровод			$D_{эк}, \delta$	
Колонны статора			$D_1, L_{ст}$	
Спиральная камера			D_1	
металлическая		бетонная		
Отсасывающая труба			$D_k, \varepsilon, h, \alpha$	
Гидрогенератор			l_o, D_p габариты и количество охладителей	

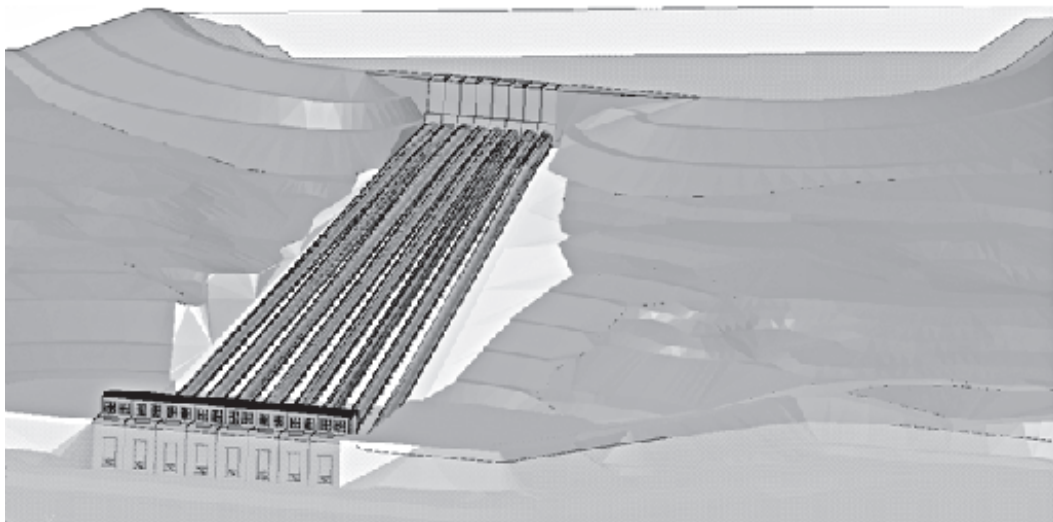


Рис. 3. Модель основных сооружений природно-технического комплекса «Ленинградская ГАЭС»

типов, рассчитаны и заданы их базовые параметры. Компонентам модели, размещенным в одном файле (сборке), было задано местоположение друг относительно друга путем наложения зависимостей, то есть ограничений степеней свободы этих элементов.

Моделирование природных условий и основных гидротехнических сооружений проводилось в графическом пакете AutoCAD Civil 3D.

В рассматриваемом объекте предусматривается строительство земляной дамбы для создания водохранилища верхнего бассейна и проведение расчистки дна для создания водохранилища нижнего бассейна ГАЭС. То есть все сооружения было целесообразно моделировать как часть поверхности модели местности. При этом, например, моделирование бетонной гравитационной плотины эффективнее осуществлять в графическом пакете, ориентированном на создание твердотельных моделей с использованием параметризации.

Полученная трехмерная модель Ленинградской ГАЭС представлена на рис. 3.

Разработанные этапы параметрического моделирования могут быть применены к любым энергетическим объектам на основе возобновляемых источников энергии. Использование управляющих параметров позволяет быстро получать трехмерную модель проектируемого объекта, что дает возможность существенно сократить сроки проектирования и создания проектной документации. Трехмерная модель может эффективно использоваться для сравнения различных компоновок сооружений, при проведении расчетов сметной стоимости строительства (определение объемов бетонных и земляных работ), позволяет повысить качество проекта за счет снижения количества проектных ошибок.

Работа выполняется в рамках ГК 02.740.11.07.50 по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Васильев, Ю.С.** Разработка чертежей зданий ГЭС методом пространственного компьютерного моделирования [Текст] / Ю.С. Васильев, Л.И. Кубышкин, О.С. Морозов // Гидротехническое строительство № 11.— С. 7–11.

2. **Васильев, Ю.С.** Компьютерные технологии в научных исследованиях и проектировании объектов возобновляемой энергетики [Текст]: учебное пособие / Ю.С. Васильев, Л.И. Кубышкин,

И.Г. Кудряшева.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— 262 с.

3. **Кубышкин, Л.И.** Автоматизация проектирования объектов возобновляемой энергетики. Ч.1. Разработка проектной графической документации [Текст]: учебное пособие / Л.И. Кубышкин.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003.— 136 с.

4. Гидроэлектростанции малой мощности [Текст]: учебное пособие / Под ред. В.В. Ели-

ратова.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007.— 432 с.

5. **Kubishkin, L.** Parametric Modeling of Hydro-electric Facilities [Текст] / L. Kubishkin, S. Svetozarskaya // Conference Proceeding «Energy Efficiency and Agricultural Engineering». Rousse-Bulgaria.— 1–3 october 2009.— House «Avangard Print» Ltd.— P. 180–189.

6. Использование водной энергии [Текст]: учебник для вузов / Под ред. Ю.С. Васильева — 4-е изд., перераб. и доп.— М.: Энергоиздат, 1995.— 608 с.

7. **Кубышкин, Л.И.** Создание библиотеки параметрических моделей гидроэнергетического оборудования [Текст] / Л.И. Кубышкин, С.В. Све-

тозарская.— XXVIII неделя науки СПбГПУ: матер. междунар. научно-практ. конф.: Ч. I.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.— С. 57–59

8. Гидроэнергетическое и вспомогательное оборудование гидроэлектростанций [Текст]: справочное пособие в 2 т. / Под ред. Ю.С. Васильева, Д.С. Щавелева. — Т. 1. Основное оборудование гидроэлектростанций.— М.: Энергоатомиздат, 1988.— 400 с.

9. **Фрейшист, А.Р.** Стальные трубопроводы гидроэлектростанций./ А.Р. Фрейшист, А.Х. Хохарин, А.М. Шор. — 3-е изд., перераб. — М.: Энергоиздат, 1982.— 248 с.

УДК 621.1

А.Г. Батухтин

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СУТОЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТАНОВОК ГЕЛИОНАГРЕВА НА АБОНЕНТСКИХ ВВОДАХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

В качестве оптимального варианта направления исследований по решению проблемы низкой эффективности совместной работы установок гелиоотопления и систем централизованного теплоснабжения и разработки энергоэффективных методов их совместного функционирования предлагается последовательность действий по разработке энергоэффективных схем гелиоотопления (гелиовоздушное отопление [1] и гелионагрев обратной сетевой воды у потребителей, оборудованных современными системами автоматического регулирования [2]) для замещения части нагрузки централизованной системы отопления. Оценивается экономический эффект от внедрения этих схем на объектах в системе централизованного теплоснабжения ТЭЦ. В частности, необходима разработка комплексной модели функционирования потребителя, оборудованного системой гелиоотопления в дополнение к основной системе отопления, и всей системы централизованного теплоснабжения населенного пункта. Разработка новых схем, а также моделей их функционирования производилась в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Одна из составных частей комплексной модели — описание функционирования потребителей тепловой энергии при различных схемах подключения установок отопления и горячего водоснабжения с различной степенью автоматизации. Эти схемы, учитывающие разнородность тепловых нагрузок и нестационарность тепловых режимов, оборудованы в дополнение к системе централизованного теплоснабжения установками гелиоотопления, работающими на нагрузку отопления и ГВС. Для описания работы потребителя в режиме реального времени необходимо получить зависимость температуры обратной сетевой воды (после потребителя) от температуры прямой сетевой воды (перед потребителем) при нерасчетных значениях нагрузки горячего водоснабжения и температуры наружного воздуха.

При моделировании функционирования в течение суток потребителей тепловой энергии в этих схемах подключения установок отопления и горячего водоснабжения необходимо знать температуру водопроводной воды после ее нагрева в баке-аккумуляторе. Исходными данными в расчете установок гелионагрева водопроводной воды для конкретного времени суток явля-



ются следующие: поток солнечного излучения, расход воды на ГВС, температуры наружного воздуха и холодной воды, а также геометрические и теплотехнические характеристики системы гелионагрева и бака-аккумулятора.

Построение моделей изменения нагрузки ГВС в течение суток для различных видов потребителей тепловой энергии

При рассмотрении работы потребителя тепла по нагрузке ГВС необходимо исходно принять разделение потребителей на две категории: жилые и административные здания. Общий вид графика нагрузки ГВС для жилых зданий в течение суток представлен на рис. 1.

Эта зависимость получена исходя из статистических исследований на основе показаний счетчиков тепловой энергии, оборудованных накопителями данных по тепловому потреблению с шагом в один час. Для выделения нагрузки ГВС выборка была сделана в период отсутствия нагрузки отопления. Для административных зданий суточный график нагрузки ГВС имеет подобный же вид, но отличительная особенность графика для административных зданий — превышение \bar{Q}_2 над \bar{Q}_4 .

Для моделирования нагрузки ГВС необходимо аналитическое или табличное описание данных зависимостей, что для графиков приведенного вида можно произвести разбиением по оси времени на 4 диапазона, ограниченные локальными максимумами и минимумами. Для представления графика в каждом из диапазонов была использована квадратичная зависимость между граничными точками (сплошная интерполяция). Для достижения достоверности такой модели функционирования потребителя по нагрузке ГВС необходимо получить граничные значения t_1, t_2, t_3, t_4 и $\bar{Q}_1, \bar{Q}_2, \bar{Q}_3, \bar{Q}_4$. Значения абсцисс и ординат граничных точек различны для разных видов потребителей ГВС. Кроме того, абсциссы и ординаты граничных точек промежутков разбиения, то есть минимумы и максимумы графика, меняются в зависимости от дня недели для всех видов потребителей.

Построение моделей изменения потока солнечного излучения в течение суток

Для построения моделей изменения потока солнечного излучения в течение суток необходимо: определить положение Солнца в требуемый

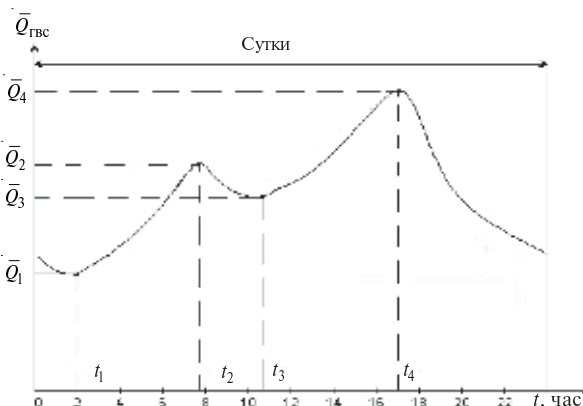


Рис. 1. Суточный график нагрузки ГВС жилых зданий

момент времени, иметь методику определения величины прямого и рассеянного солнечного излучения на горизонтальную площадку, а также способ определения солнечного излучения, падающего на произвольно наклоненную площадку.

Определение положения Солнца сводится к вычислению угла высоты над горизонтом и азимута. Также рекомендуется рассчитать время восхода и захода.

Исходные данные: дата (день, месяц, год), географические координаты текущего местоположения, время суток и часовой пояс. При необходимости следует учесть декретное время и зимнее/летнее время. Астрономический расчет можно производить различными способами. В нашей методике был адаптирован к гражданскому времени по поясам РФ формализованный метод, предложенный в [3]. При этом учитываются особенности движения Земли вокруг

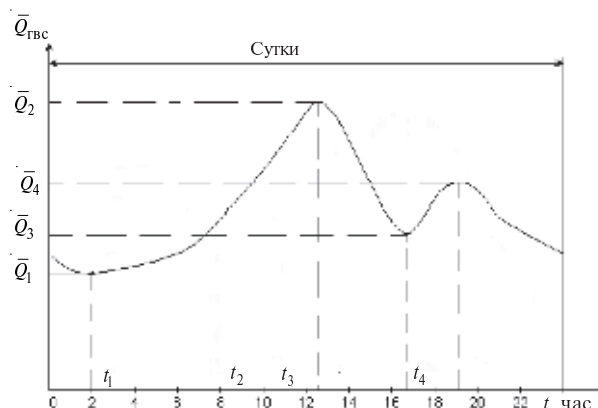


Рис. 2. Суточный график нагрузки ГВС административных зданий

Солнца, а также характеристики точки расположения лучевоспринимающей поверхности.

Величины градусов и часов приводятся в десятичном формате. Номер дня определяется по эмпирической формуле

$$d = 367Y - 7 \frac{Y + \frac{M+9}{12}}{4} + \frac{275M}{9} + D - 730530, \quad (1)$$

где Y — год, записанный четырехзначным числом; M — месяц (1–12); D — день.

В формуле (1) все операции деления должны выполняться целочисленно.

Долгота перигелия, град.:

$$w = 282,9404 + 4,70935 \cdot 10^{-5} d. \quad (2)$$

Средняя аномалия, град.:

$$M = 356,047 + 0,9856002585d. \quad (3)$$

Полученную величину следует преобразовать в диапазон $[0; 360]$. Наклон эклиптики в градусах определяется так:

$$Obl_{ecl} = 23,4393 - 3,563 \cdot 10^{-7} d. \quad (4)$$

Эксцентриситет рассчитываем по формуле

$$e = 0,016709 - 1,151 \cdot 10^{-9} d. \quad (5)$$

Эксцентрическая аномалия в градусах определяется по формуле

$$E = M + \frac{180}{\pi} e \sin M (1 + e \cos M). \quad (6)$$

Средняя долгота Солнца в градусах равна

$$L = w + M. \quad (7)$$

Координаты Солнца в прямоугольной системе координат (с учетом а.е. = 1):

$$x = \cos E - e;$$

$$y = \sqrt{1 - e^2} \sin E.$$

Истинная аномалия, градусы в диапазоне $(-180; 180]$:

$$v = \arctg \frac{y}{x}.$$

Долгота солнца, град.:

$$Lon = v + w.$$

Расстояние от Земли до Солнца, а.е.:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Координаты Солнца в эклиптической прямоугольной системе координат:

$$x_{eclip} = r \cos(Lon);$$

$$y_{eclip} = r \sin(Lon);$$

$$z_{eclip} = 0.$$

Координаты Солнца в экваториальной прямоугольной системе координат:

$$x_{equat} = x_{eclip};$$

$$y_{equat} = y_{eclip} \cos(Obl_{ecl}) - z_{eclip} \sin(Obl_{ecl});$$

$$z_{equat} = y_{eclip} \sin(Obl_{ecl}) + z_{eclip} \cos(Obl_{ecl}).$$

Склонение Солнца, град.:

$$D_{ecl} = \arcsin \frac{z_{equat}}{r}. \quad (8)$$

Прямое восхождение, град.:

$$RA = \arctg \frac{y_{equat}}{x_{equat}}. \quad (9)$$

Сидерическое время, ч:

$$SidTime = GMST_0 + UT + \frac{LON}{15}, \quad (10)$$

где $GMST_0$ — сидерическое время на гринвичском меридиане при 00:00; UT — время по Гринвичу; LON — долгота местности в градусах.

Западная долгота отрицательна, восточная долгота — положительна. Деление на 15 осуществляется для того, чтобы перевести градусы в часы. Если сидерическое время получается отрицательным, то к результату следует прибавить 24; если же результат больше 24, то это число следует отнять. Величина $GMST_0$ определяется так:

$$GMST_0 = \frac{L \pm 180^0}{15}.$$

Часовой угол равен

$$HA = SidTime - \frac{RA}{15}.$$

Преобразование в астрономические прямоугольные координаты:

$$x = \cos HA \cos D_{ecl};$$

$$y = \sin HA \cos D_{ecl};$$

$$z = \sin D_{ecl}.$$



Преобразование в координаты с привязкой к горизонту и с учетом широты lat (в градусах):

$$x_{hor} = x \sin lat - z \cos lat; ,$$

$$y_{hor} = y;$$

$$z_{hor} = x \cos lat + z \sin lat.$$

Угол высоты Солнца над горизонтом, град.:

$$h = \arcsin z_{hor}.$$

Если угол высоты получился отрицательным, то Солнце в данный момент находится под горизонтом. Азимут Солнца в градусах равен

$$az = \arctg \frac{y_{hor}}{x_{hor}} + 180^\circ.$$

Слагаемое 180° необходимо для того, чтобы азимут отсчитывался от севера. Часовой угол Солнца при восходе и заходе с учетом рефракции, град.:

$$t = \arccos(\cos 90,834 - \lg lat \cdot \lg D_{ecl}). \quad (11)$$

Местное звездное время соответственно восхода и захода равно в часах

$$S_{восход} = \frac{RA - t}{15},$$

$$S_{заход} = \frac{RA + t}{15}.$$

Полученный результат при необходимости следует пересчитать в гражданское время. Время истинного полдня, соответствующего времени верхней кульминации Солнца, когда прямая солнечная радиация максимальна, рассчитывается так:

$$S_{полдень} = \frac{S_{восход} + S_{заход}}{2}. \quad (12)$$

С учетом принятых в Российской Федерации декретного и летнего времени истинный полдень не соответствует местному времени. Например в г. Чите полдень наступает в 14:30 гражданского времени.

При оценке времени восхода и захода необходимо учитывать высоту над уровнем моря, а также возможное затенение рельефом местности. При этом необходимо корректировать значение местного времени восхода и захода на поправку, определяемую величиной затенения.

Величины максимального прямого и рассеянного солнечного излучения на горизонтальную площадку в течение светлого безоблачного вре-

мени суток определяются по метеорологическим наблюдениям, зарегистрированным местным центром гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды. При этом рекомендуется без значительного снижения точности усреднять значения для двухнедельного интервала. При построении моделей изменения потока солнечного излучения в течение суток считаем, что известны максимальные значения солнечной радиации для рассматриваемых суток. Если известно максимальное значение плотности потока прямой солнечной радиации I_S^{\max} за сутки, определить значение плотности потока в момент времени τ с учетом положения Солнца в этот момент времени можно по формуле

$$I_S = I_S^{\max} \sin \left(\frac{\tau - S_{восход}}{S_{заход} - S_{восход}} \right). \quad (13)$$

Соотношение между прямым и рассеянным солнечным излучением — величина переменная, зависящая от времени года и времени суток, известного для конкретной местности расположения коллектора. На рис. 3 изображен суточный график отношения количества рассеянного солнечного излучения к общему при безоблачной погоде для условий г. Читы. При оценке реальной интенсивности солнечного потока можно воспользоваться балльной системой определения облачности в прогнозах погоды [4] с учетом детализации по времени особенностей ожидаемой погоды в течение суток.

Детализацию в течение суток осуществляют с учетом следующих характерных периодов суток:

Термины, применяемые в прогнозах облачности

Баллы облачности

Ясно, ясная погода, малооблачно, малооблачная погода, небольшая облачность, солнечная погода	До 3 — для облачности среднего и или нижнего яруса или любом количестве облаков верхнего яруса
Переменная (меняющаяся) облачность	От 1–3 до 4–7 — для нижнего и (или) среднего яруса
Облачно с прояснениями; облачная погода с прояснениями	4–7 — для нижнего или среднего яруса или сочетаний облаков среднего и нижнего яруса общим количеством до 7 среднего яруса
Облачно, облачная погода, значительная облачность, пасмурно, пасмурная погода	8–10 — для нижнего яруса или плотных, непросветивающих форм облаков среднего яруса

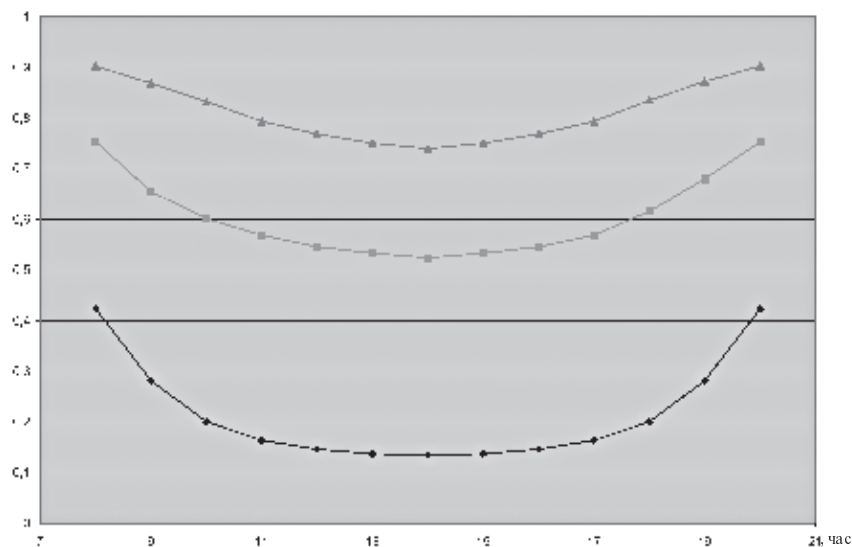


Рис. 3. Суточный график отношения количества рассеянного солнечного излучения к общему при безоблачной погоде
— январь, — апрель, — июль

Характеристики облачности и соответствующие терминам количественные баллы:

Период суток	Время (местное, гражданское), ч
Утро	С 5 до 10
Первая половина дня	С 10 до 13
Вторая половина дня	С 13 до 17
Вечер	С 17 до 22
Первая половина ночи	С 22 до 1
Вторая половина ночи	С 1 до 5

В соответствии с балльной характеристикой облачности в долях от 10 происходит снижение интенсивности прямого солнечного излучения, при этом диффузионная составляющая увеличивается:

$$I_{\text{факт}} = I_S(1 - \beta_{\text{обл}}) + I_D(1 + A_D\beta_{\text{обл}}), \quad (14)$$

где $\beta_{\text{обл}}$ — балльная характеристика облачности в долях; A_D — коэффициент возрастания доли диффузионного излучения при облачности.

Дополнительными исходными данными для расчета солнечного излучения, падающего на произвольно наклоненную площадку, являются азимутальное направление площадки и угол ее наклона к горизонту. При этом рассматривается азимутальное направление на север, например, если коллектор направлен на 120° к югу, то в расчетах применяется угол $120^\circ - 180^\circ = -60^\circ$.

Зная мощность прямого излучения на горизонтальную площадку, определим мощность излучения на площадку, расположенную перпендикулярно падению солнечных лучей, и назовем подобное расположение идеальным:

$$I_S^{\text{ид}} = \frac{I_S^{\text{гориз}}}{\cos h}. \quad (15)$$

Полученная величина соответствует максимально возможной мощности прямого солнечного излучения, падающего на наклонную площадку.

Угол падения лучей на произвольно расположенную площадку [5], наклоненную к югу под углом β и ориентированную на север под углом γ :

$$i = \arccos((A - B)\sin D_{\text{ecl}} + (C\sin HA + (D + E)\cos HA)\cos D_{\text{ecl}}), \quad (16)$$

где

$$A = \sin lat \cos \beta;$$

$$B = \cos lat \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma;$$

$$C = \sin \beta \cdot \sin \gamma;$$

$$D = \cos lat \cdot \cos \beta;$$

$$E = \sin lat \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma.$$

Тогда мощность прямого солнечного излучения на наклонную площадку определится как

$$I_S = I_S^{\text{ид}} \cdot \cos i. \quad (17)$$

Отношение $\frac{I_S}{I_{ид}}$ характеризует эффектив-

ность ориентирования площадки по прямому излучению и может быть рассчитано как для данного момента (в таком случае значение совпадает с величиной $\cos i$), так и для суток или месяца. Расчет интенсивности потока полной солнечной радиации определяется как

$$I = I_S + P_D I_D, \quad (18)$$

где I_D — плотность потока диффузной солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность; P_D — коэффициент положения солнечного коллектора для рассеянной радиации,

определяемый по формуле $P_D = \cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right)$.

Определение количества теплоты, полезно воспринятого теплоносителем, возможно по формуле

$$Q_{пол} = IF\eta_{ск}, \quad (19)$$

где F — эффективная площадь приемника солнечного излучения; $\eta_{ск}$ — эффективность приемника, учитывающая эффективность поглощения лучистой энергии и передачи тепла теплоносителю.

В случае коллектора с вакуумными трубками преобладают потери теплоты с излучением.

Модель установки гелионагрева водопроводной воды

Моделирование установки гелионагрева водопроводной воды сводится к определению комплекса процессов теплообмена в первом контуре системы (рис. 4). С одной стороны, осуществляется подвод теплоты промежуточному теплоносителю в солнечном коллекторе, а с другой, — подвод тепла водопроводной воды в баке-аккумуляторе. Решить данную задачу можно, используя метод последовательных приближений, заключающийся в том, что необходимо задаться температурой промежуточного теплоносителя на выходе из баке-аккумулятора и рассчитать температуру на входе в бак на основе модели солнечного коллектора, а затем уточнить на основе сравнения с полученной при расчете бака по соответствующей модели.

При расчете солнечного коллектора системы гелионагрева водопроводной воды исходными данными являются: параметры коллектора, рас-

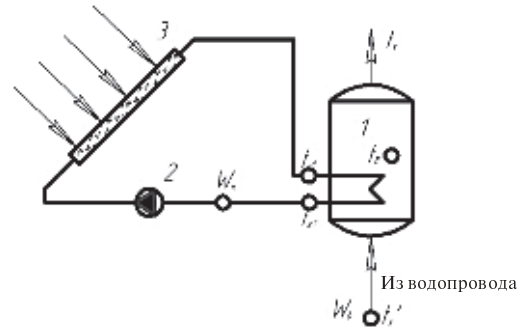


Рис. 4. Установка гелионагрева водопроводной воды

ход промежуточного теплоносителя, характеристика временного промежутка, а также температура наружного воздуха. При расчете баке-аккумулятора определяется температура промежуточного теплоносителя на выходе из него. Результатом расчета является температура промежуточного теплоносителя на входе в бак.

Основой расчета солнечного коллектора в конкретный момент времени служит характеристика интенсивности фактической солнечной радиации, падающей на лучевоспринимающую поверхность, с учетом его установки.

Поток солнечной энергии, воспринятый теплоносителем, с учетом КПД солнечного коллектора транспортных потерь теплоты в трубопроводах, ведущих к баку-аккумулятору:

$$Q_{ск} = IFk_0 - Q_{тр}^{пот} - Q_{конв}^{пот} - Q_{изл}^{пот}, \quad (20)$$

где k_0 — эффективный оптический коэффициент солнечного коллектора.

Транспортные потери определяем через КПД данных потерь:

$$Q_{тр}^{пот} = (1 - \eta_{тр}) Q_{полез}. \quad (21)$$

При неизолированных трубопроводах тепловые потери следует определять по стандартной методике с учетом термического сопротивления теплопередачи однородной цилиндрической стенки. Суммарные потери теплоты при теплопередаче для обоих трубопроводов:

$$\begin{aligned} Q_{тр}^{пот} &= G(i_{ск}^{вх} - i_{ба}^{вх})f_{сеч} + G(i_{ба}^{вх} - i_{ск}^{вх})f_{сеч} = \\ &= Gf_{сеч} \left((i_{ск}^{вх} - i_{ба}^{вх}) + (i_{ба}^{вх} - i_{ск}^{вх}) \right), \end{aligned} \quad (22)$$

где G — расход теплоносителя; $i_{ск}^{вх}$ и $i_{ба}^{вх}$ — энтальпии теплоносителя соответственно на входе и выходе из солнечного коллектора (индекс «ск»)

или бака-аккумулятора (индекс «ба»); $f_{сеч}$ — площадь поперечного сечения трубопровода.

Тогда температура на входе в солнечный коллектор равна

$$t_{ск}^{вх} = t_{ба}^{вх} - \frac{Q_{тр}^{пот}}{2Gc_p}, \quad (23)$$

где c_p — удельная изобарная теплоемкость теплоносителя, определяемая по температуре $t^{вх}$.

Суммарные конвективные потери теплоты от солнечного коллектора определяются по формуле

$$\sum Q_{пл}^{пот.конв} = \alpha_{окр} \sum_i (t_{ск-i} - t_{окр}) F_i, \quad (24)$$

где α — коэффициент теплоотдачи окружающему воздуху; $t_{ск-i}$ — температура i -го участка коллектора, непосредственно контактирующего с воздухом; F_i — площадь поверхности данного участка; $t_{окр}$ — температура окружающего воздуха.

К участкам коллектора относятся площади, омываемые наружным воздухом. Для вакуумных коллекторов к участкам теплотерь можно не относить участки с вакуумной прослойкой.

Помимо конвективных потерь имеют место потери теплоты с излучением:

$$\sum Q_{изл}^{пот} = c_0 \sum_i \varepsilon_i \left(\frac{t_{ск-i} + 273}{100} \right)^4 F_i, \quad (25)$$

где c_0 — постоянная Стефана — Больцмана, равная $5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; ε_i — коэффициент излучения i -го участка коллектора; F_i — площадь поверхности данного участка.

Основным источником потерь теплоты с излучением служит собственно лучевоспринимающая пластина. Потери теплоты с излучением обеих сторон пластины при учете двойного остекления:

$$\begin{aligned} \sum Q_{пл}^{пот.изл} = \\ = \sum_i \left[\left(\frac{\bar{t}_{пл} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{окр} + 273}{100} \right)^4 \right] \times \\ \times D^2 (\varepsilon_{луч} + \varepsilon_{изн}) c_0 F_{пл}, \end{aligned} \quad (26)$$

где $\varepsilon_{луч}$ и $\varepsilon_{изн}$ — коэффициенты излучения соответственно лучевоспринимающей и изнаночной сторон пластины.

Температура нагрева лучевоспринимающей пластины $t_{пл}$ — величина переменная, завися-

щая от характеристик коллектора и текущей интенсивности солнечного излучения. Среднее значение $t_{пл}$ может быть найдено с учетом изменения $Q_{изл}$; сводя зависимость $t = f(Q_{изл})$ к $t = f(\tau)$, получим

$$\begin{aligned} \bar{t}_{пл} = & \left(t_{пл}^{max} - t_{пл-ночь} \right) \times \\ & \times \sin \left(\frac{\tau - S_{восход}}{S_{заход} - S_{восход}} \right) + t_{пл-ночь}, \end{aligned} \quad (27)$$

где $t_{пл-ночь}$ — средняя температура и пластины в ночное время; $t_{пл}^{max}$ — максимальная температура в средние сутки рассматриваемого месяца года, характерная для рассматриваемой погоды.

В случае, если изнаночная сторона изолирована, $\varepsilon_{изн} = 0$. Потерю теплоты с отраженным излучением находим так:

$$Q_{пл}^{пот.отр} = (1 - \varepsilon_i) Q_{изл} n.$$

Расчет температуры на выходе из солнечного коллектора определяется по формуле

$$t_{ск}^{вх} = t_{ск}^{вх} - \frac{Q_{ск}}{2Gc_p}. \quad (28)$$

Соответственно температура на входе в бак-аккумулятор с учетом потерь в подводящих трубопроводах определится выражением

$$t_{ба}^{вх} = t_{ск}^{вх} - \frac{Q_{тр}^{пот}}{2Gc_p}. \quad (29)$$

При расчете бака-аккумулятора исходными данными являются параметры бака, расходы промежуточного теплоносителя и водопроводной воды, а также температура промежуточного теплоносителя на входе в бак.

По известным значениям α и характеристикам трубок находим коэффициент теплопередачи. После чего может быть определено количество передаваемой теплоты:

$$Q = \mu k \Delta t_{ср} F,$$

где ε — коэффициент, учитывающий накипь и загрязнения трубок подогревателя; $\Delta t_{ср}$ — среднелогарифмическая разность температур, определяется методом последовательных приближений.

Зная количество передаваемой теплоты, находим температуры теплоносителей на выходе из теплообменника:

$$T_2 = T_1 + \frac{Q}{G_T c_{p(T)}}, \quad (30)$$

$$t_2 = t_1 + \frac{Q}{G_M c_{p(M)}}. \quad (31)$$

Поскольку бак-аккумулятор имеет объем аккумулируемой жидкости, то необходимо определять среднюю температуру водопроводной воды на выходе из него в рассматриваемый временной промежуток и среднюю температуру в баке в начале следующего временного промежутка:

$$t_6 = t_x'' = \frac{G_M \tau t_2 + V_6 t_6^H}{G_M \tau + V_6}, \quad (32)$$

где V_6 — объем бака.

Разработка модели функционирования потребителей тепловой энергии, оборудованных в дополнение к системе централизованного теплоснабжения установками гелионагрева

Максимальный экономический эффект наблюдается при применении установок гелионагрева совместно с установкой горячего водоснабжения по одноступенчатой параллельной схеме, а отопительной установки — по зависимой схеме (с наличием регулятора температуры горячей воды и регулированием расхода сетевой воды на отопление) (рис. 5).

Поскольку при моделировании работы потребителя в такой системе в режиме реального времени необходимо получение зависимости температуры обратной сетевой воды (после потребителя) от температуры прямой сетевой воды (перед потребителем), то исходными данными для расчета являются: температура прямой сетевой воды τ_1 , текущая нагрузка горячего водоснабжения $Q_{ГВС}$, температура воздуха в помещении t_b , а также гидравлические характеристики потребителя.

Гидравлическая характеристика W находится с использованием модели функционирования разветвленной системы транспортировки и распределения тепловой энергии, которая учитывает различную инерционность участков тепловых сетей и их аккумулирующую способность, а также характеристику абонента для различных температур наружного воздуха, входящую в данную модель [6].

Расчет начинаем с подогревателя горячей воды, используя методику, представленную в [7]. Температура воды на входе в подогреватель принимается равной температуре на выходе из бака.

Зная расход воды на подогреватель, находим температуру сетевой воды после него с учетом снижения нагрузки ГВС:

$$\tau_{2ГВС} = \tau_1 - Q_{ГВС2}/W_{П}. \quad (33)$$

Зная расход на отопительную установку $W_{от}$ и температуру сетевой воды перед отопительной установкой, рассчитываем текущую нагрузку отопления.

По известной нагрузке отопления Q_o находим температуру сетевой воды после отопительной установки, используя формулу

$$\tau_{2от} = \tau_1 - Q_o/W_{от}. \quad (34)$$

Далее производим расчет температуры сетевой воды после точки смешения сетевой воды из отопительной установки с сетевой водой

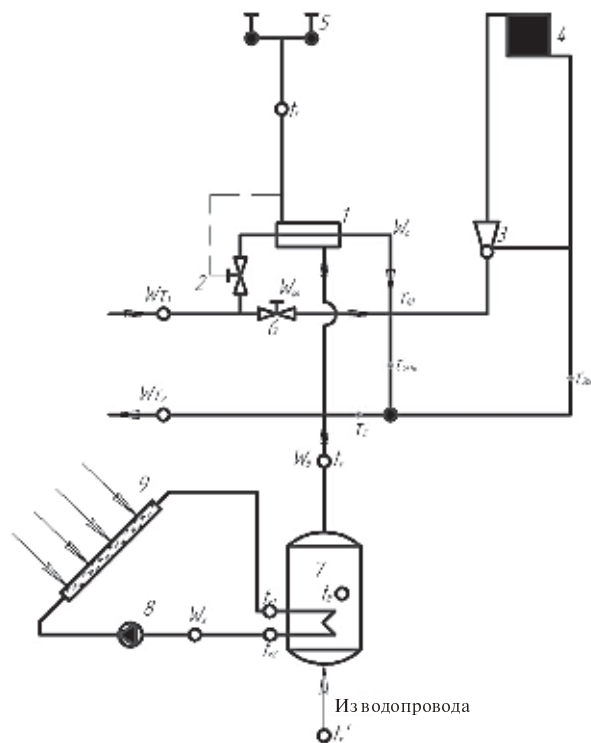


Рис. 5. Присоединение установки горячего водоснабжения по одноступенчатой параллельной схеме и отопительной установки по зависимой схеме (с наличием регулятора температуры горячей воды и регулированием расхода сетевой воды на отопление)

после верхней ступени подогревателя горячей воды:

$$\tau_2^1 = \tau_2^1 \frac{\tau_{2гвс} W_{п} - \tau_{2от} W_{пп}}{W}. \quad (35)$$

Так как нижняя ступень подогревателя горячей воды отсутствует, то температура обратной сетевой воды равна температуре сетевой воды после точки смешения: $\tau_2 = \tau_2^1$.

Расчет функционирования системы гелионагрева совместно с установками горячего водоснабжения и отопительными установками централизованного теплоснабжения, присоеди-

ненными по другим схемам с различной степенью автоматизации, производится по методике, представленной в [7, 8], с особенностями, которые описаны выше.

Предложенная методика описания функционирования потребителей, присоединенных к системе централизованного теплоснабжения и оборудованных установками гелионагрева, в режиме реального времени позволяет осуществить оценку влияния их функционирования на всю систему с учетом нестационарности поступления солнечной радиации, а также изменения в течении суток нагрузок отопления и горячего водоснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батухтин, А.Г. Современные методы повышения эффективности совместной работы установок гелиоотопления и систем централизованного теплоснабжения [Текст] / А.Г. Батухтин, С.Г. Батухтин // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2009.— № 3.— С. 48–53.
2. Батухтин, А.Г. Методы повышения эффективности функционирования современных систем транспортировки, распределения и потребления тепловой энергии [Текст] / А.Г. Батухтин, М.С. Басс, С.Г. Батухтин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2009. № 2.— С. 199–202.
3. Электронный ресурс.— <http://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html>.
4. РД 52.27.— Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения [Текст]. — 2009.
5. Виссарионов, В.И. Солнечная энергетика [Текст]: учеб. пособие для вузов / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Малинин; под ред. В.И. Виссарионова. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 207 с.
6. Маккавеев, В.В. Математическая модель ряда абонентских вводов закрытых систем теплоснабжения [Текст] / В.В. Маккавеев, А.Г. Батухтин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2009. № 3.— С. 200–207.
7. Батухтин, А.Г. Оптимизация отпуска теплоты от ТЭЦ на основе математического моделирования с учетом функционирования различных типов потребителей [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук. / А.Г. Батухтин / Улан-Удэ.: ВСГТУ.— 2005 — 16 с.
8. Батухтин, А.Г. Методы повышения эффективности и увеличения располагаемой мощности систем централизованного теплоснабжения [Текст] / А.Г. Батухтин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2010. № 1.— С. 189–192.

УДК 621.926.46: 662.62

К.А. Григорьев

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ТОПЛИВА В МЕЛЬНИЦАХ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Низкотемпературная вихревая (НТВ) технология — одна из наиболее перспективных технологий сжигания твердого топлива. Концепцию НТВ-сжигания предложил на рубеже 70-х годов прошлого века профессор В.В. Померанцев. Отличительная особенность НТВ-технологии —

принцип факельного сжигания грубоизмельченного топлива в условиях многократной циркуляции частиц в зоне активного горения. Это позволяет повысить устойчивость воспламенения топлива, исключить шлакование поверхностей нагрева и снизить вредные выбросы.



Подготовка топлива для НТВ-сжигания происходит в пылеприготовительных системах (ППС) с использованием, как правило, типовых быстроходных мельниц: молотковых (ММ) или мельниц-вентиляторов (М-В). Для подготовки пыли грубого помола отработаны ППС прямого вдувания с мельницами ММ и М-В, оборудованными упрощенными сепараторами либо без сепараторов [1, 2]. Угрубление помола для НТВ-сжигания позволяет повысить производительность ППС и обеспечить ее взрывобезопасность.

Нормативный метод расчета пылесистем [3] не распространяется на ППС с угрубленным помолом топлива. Отработка систем подготовки топлива в отсутствие надежных методов расчета ППС с угрубленным помолом базировалась в основном на интуиции и приближенных расчетных оценках, что в ряде случаев не давало ожидаемого результата, осложняло внедрение НТВ-технологии и приводило к материальным и моральным издержкам.

В статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований закономерностей измельчения топлива в мельницах, которые можно рассматривать как обоснование нового подхода к расчету ППС с быстроходными мельницами при угрубленном помоле.

Законы измельчения и их экспериментальная проверка

В теории измельчения наиболее известны законы Риттингера (энергия разрушения пропорциональна вновь образованной поверхности) [4], Кика — Кирпичева (работа пропорциональна объему измельчаемого тела) [5], Бонда (эмпирическая зависимость энергозатрат от параметров измельчения) [6].

Общее выражение, объединяющее уравнения разных авторов, можно представить в дифференциальной форме [7]

$$dE = -k \frac{dx}{x^n}, \quad (1)$$

где E — удельная энергия, сообщаемая единице объема (массы) разрушенного тела, необходимая для прироста энергии вновь образованной поверхности; k — коэффициент пропорциональности; x — средний размер (диаметр) зерен; n — показатель степени, зависящий от крупности частиц и способа измельчения [7].

Уравнение Риттингера может быть получено путем интегрирования уравнения (1) в пределах изменения средних по массе размеров исходного D_s и конечного d_s зерна измельчаемого материала при $n = 2$:

$$E = k_R \left(\frac{1}{d_s} - \frac{1}{D_s} \right) = k_R \frac{i_s - 1}{D_s}, \quad (2)$$

где $i_s = D_s / d_s$ — степень (кратность) измельчения материала.

Уравнение Кика — Кирпичева может быть получено из (1) интегрированием его в тех же пределах при $n = 1$:

$$E = k_K \ln \left(\frac{D_s}{d_s} \right) = k_K \ln i_s. \quad (3)$$

В результате обработки данных многочисленных серий опытов по дезинтеграции широкого диапазона руд Бонд нашел [6], что

$$E = k_B \left(\frac{1}{\sqrt{d_s}} - \frac{1}{\sqrt{D_s}} \right) = k_B \frac{\sqrt{i_s} - 1}{\sqrt{D_s}}. \quad (4)$$

Уравнение (4) может быть получено из уравнения (1) интегрированием при $n = 1,5$.

Коэффициенты пропорциональности в уравнениях (2)–(4) свяжем с именами авторов законов измельчения: k_R — коэффициент Риттингера; k_K — коэффициент Кика; k_B — коэффициент Бонда.

Сомножители при коэффициентах пропорциональности в уравнениях (2)–(4) называют [8, 9] показателями разрушения по соответствующей гипотезе. Применительно к мельницам целесообразно назвать эти величины показателями измельчения, присвоив им общее обозначение P с соответствующим индексом. Например, показатель измельчения по гипотезе Риттингера

$$P_R = \frac{i_s - 1}{D_s}, \quad (5)$$

по гипотезе Кика — Кирпичева

$$P_K = \ln i_s, \quad (6)$$

по гипотезе Бонда

$$P_B = \frac{\sqrt{i_s} - 1}{\sqrt{D_s}}. \quad (7)$$

Принято считать [8, 10, 11], что закон Кика — Кирпичева работает в области грубого

дробления, закон Риттингера — в области тонкого измельчения, а закон Бонда справедлив в промежуточной области умеренного дробления.

Анализ уравнений (2)–(4) показывает, что связь между энергией E , затрачиваемой на измельчение материала, и его начальной D_s и конечной d_s крупностью, а также степенью сокращения i_s , определенная по разным гипотезам, существенно различается.

Критерием «работоспособности» конкретного закона измельчения является постоянство коэффициентов пропорциональности в уравнениях (2)–(4) при изменении в достаточно широком диапазоне значений энергозатрат E и соответствующего показателя измельчения. С другой стороны, коэффициенты пропорциональности в уравнениях (2)–(4) должны учитывать физико-химические и механические свойства измельчаемого материала, а также условия процесса, включая конструктивные характеристики и режимные параметры измельчителя.

Проверка основных законов измельчения выполнена по экспериментальным данным, полученным В.П. Осокиным [8] на стендовой ППС

с моделью ММ, оснащенной инерционным сепаратором, при размоле воздушно-сухого экибастузского каменного угля.

Размол угля в мельнице, имеющей диаметр ротора $D = 0,3$ м и длину ротора $L = 0,05$ м, производился при следующих условиях: исходная крупность кусков изменялась в пределах $D_s = 3,4–12,8$ мм и $D_{\max} = 7–25$ мм; расход топлива варьировался в пределах $B = 11,1–24,7$ кг/с, что соответствовало удельной нагрузке на ротор $B/DL = 740–1647$ кг/(м²·с); частота вращения ротора n_p равнялась 53 и 82,8 с⁻¹, что соответствовало окружной скорости на внешнем диаметре ротора u_p 50 и 78 м/с. Серия состояла из 12 опытов.

Следует отметить, что конструктивные характеристики установки не изменялись. Некоторыми различиями физико-химических и механических свойств измельчаемого в воздушно-сухом состоянии топлива между отдельными его партиями (то есть в разных опытах) в первом приближении можно пренебречь.

На рис. 1 отражены результаты авторской обработки опытных данных, приведенных в ра-

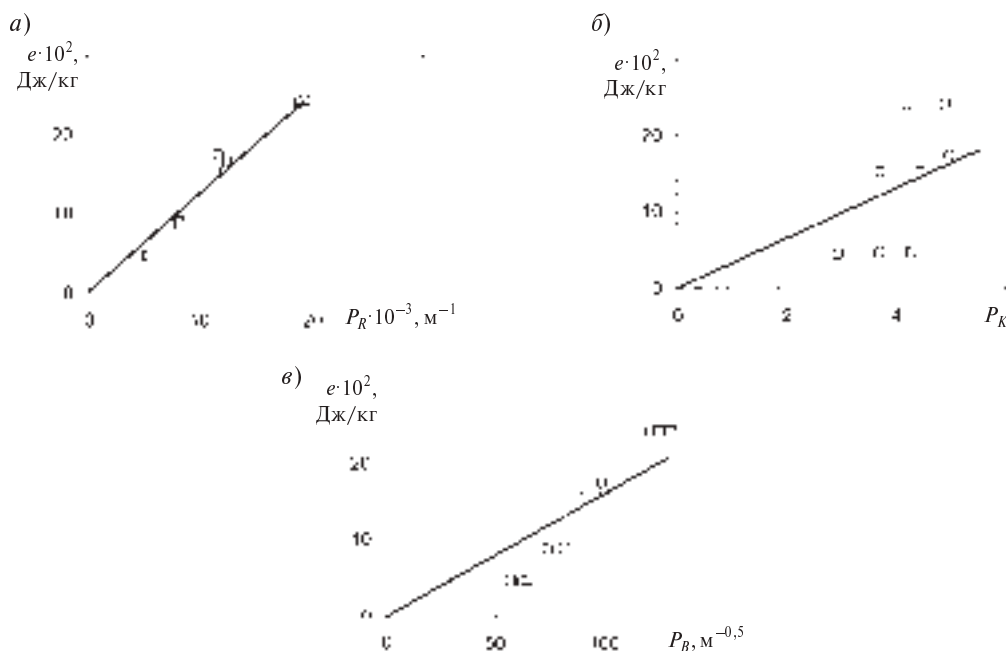


Рис. 1. Изменение удельной энергии e (приведенной к условной мощности при $u_p = 50$ м/с) при измельчении воздушно-сухого экибастузского угля в стендовой ММ с инерционным сепаратором в зависимости от показателя разрушения материала, принятого по различным гипотезам: а — Риттингера (достоверность аппроксимации $R^2 = 0,957$); б — Кика — Кирпичева ($R^2 = 0,32$); в) — Бонда ($R^2 = 0,735$) (авторская обработка данных работы [8])



боте [8]. Кратность измельчения угля изменялась в диапазоне $i_s = 18-250$, который перекрывает пределы измельчения в промышленных установках ($i_s = 20-100$). Ввиду отсутствия в работе [8] данных о затратах энергии на размол подсчет энергозатрат по отдельным опытам проведен в относительных величинах e , приведенных к условной мощности, принятой за единицу при частоте вращения ротора $n_p = 53 \text{ с}^{-1}$ ($u_p = 50 \text{ м/с}$). Общий индекс изменения удельных затрат энергии (отношение максимального значения к

Анализ показал, что наилучшие результаты — наименьший разброс точек от прямой, которая определяет коэффициент пропорциональности, с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,957$ — соответствуют закону Риттингера; при этом для закона Кика — Кирпичева получено $R^2 = 0,32$, а для закона Бонда — $R^2 = 0,735$.

Таким образом, полученный результат, по сути, экспериментально подтверждает закон измельчения Риттингера и обосновывает его применение для описания размол органического топлива в мельницах.

Теоретические основы измельчения топлива в мельницах

Теория идеального измельчения. Из определения закона Риттингера затраты энергии на измельчение можно выразить следующим образом:

$$E = k_S \Delta S = k_S (S_D - S_d), \text{ Дж}, \quad (8)$$

где k_S — коэффициент пропорциональности, Дж/м²; S_D, S_d — поверхность материала соответственно до и после измельчения, м².

Рассмотрим закон Риттингера (8) на примере идеального разрушения тела правильной формы, например кубика с ребром D . В результате идеального разрушения можно получить n_d новых кубиков с ребром d . Поверхности тела до и после измельчения равны соответственно $S_D = 6D^2$ и $S_d = n_d 6d^2$.

Приращение вновь образованной поверхности

$$\Delta S = S_d - S_D = n_d 6d^2 - 6D^2. \quad (9)$$

Учитывая, что суммарный объем вновь полученных кубиков равен объему исходного тела V_D , можно записать

$$V_D = D^3 = n_d V_d = n_d d^3,$$

откуда следует, что

$$n_d = \frac{D^3}{d^3}.$$

Тогда (9) принимает вид

$$\Delta S = 6 \frac{D^3 d^2}{d^3} - 6D^2 = 6D^2 \left(\frac{D}{d} - 1 \right),$$

или с учетом, что кратность измельчения равна $i = D/d$,

$$\Delta S = 6D^2(i-1). \quad (10)$$

Подстановка значения ΔS , соответствующего (10), в равенство (8) показывает, что затраты энергии при измельчении куба на равновеликие части по закону Риттингера равны

$$E = 6k_S D^2(i-1), \text{ Дж}.$$

Приращение поверхности ΔS , отнесенное к объему V_D измельчаемого тела,

$$\frac{\Delta S}{V_D} = \frac{6D^2}{D^3}(i-1) = \frac{6(i-1)}{D},$$

а приращение поверхности ΔS , отнесенное к единице массы измельчаемого тела,

$$\frac{\Delta S}{m_D} = \frac{6D^2}{\rho_K D^3}(i-1) = \frac{6}{\rho_K} \frac{(i-1)}{D}, \quad (11)$$

где m_D — масса измельчаемого тела, кг, $m_D = \rho_K V_D = \rho_K D^3$; ρ_K — кажущаяся плотность измельчаемого материала, кг/м³.

В технике измельчения затраты энергии на размол принято относить к единице массы измельчаемого материала.

Тогда согласно закону Риттингера (8) с учетом соотношения (11) для удельной энергии Θ , затраченной на измельчение, можно записать равенство

$$\Theta = k_S \frac{6}{\rho_K} \frac{i-1}{D} = k_R \frac{i-1}{D}, \quad \text{Дж/кг}, \quad (12)$$

по форме соответствующее уравнению (2), полученному путем интегрирования общего выражения (1), которое объединяет законы измельчения.

Если, исследуя идеальное разрушение, вместо кубической формы измельчаемого куска рассматривать шар диаметром D , то результирующее выражение (12) не изменится, так как удельная поверхность, отнесенная к объему (или массе), для шара и куба одинакова. Действительно, для шара

$$\frac{S}{V} = \frac{D^2}{D^3 / 6} = \frac{6}{D},$$

а для куба

$$\frac{S}{V} = \frac{6D^2}{D^3} = \frac{6}{D}.$$

Для полидисперсного материала совокупность частиц до и после размол можно усреднить (по массе) частицами с соответствующими размерами D_s и d_s . При идеальном измельчении полидисперсного материала итоговое выражение для удельной энергии (12) формально также не изменится (за исключением нижних индексов s при величинах i и D).

Размол влажного полидисперсного материала в мельнице совмещен с подсушкой топлива, т. е. процесс протекает с изменением начальной массы материала, но при сохранении его начального объема. Однако и в этом случае итоговое выражение для удельной энергии (12) не изменится, поскольку энергозатраты и приращение поверхности отнесены к 1 кг сырого топлива.

Таким образом, можно утверждать, что закон Риттингера (12) достаточно универсален и может быть использован при аналитическом описании измельчения, включая совмещенный с сушкой размол влажного полидисперсного материала в мельнице.

Анализ закона Риттингера. Выражение для удельной энергии (12) с учетом соотношения (5) можно записать так:

$$\Theta = k_R P_R, \text{ Дж/кг.} \quad (13)$$

Анализ уравнения (2), описывающего закон Риттингера, и уравнений (12), (13), вытекающих из этого закона, показывает, что коэффициент Риттингера k_R должен учитывать условия измельчения и характеристики измельчаемого материала. В первом приближении к ним относятся:

1) параметр k_c , обобщающий конструкцию и режим работы (например, частота вращения ротора, вентиляция) мельницы; символ s означает «условие» (от англ. *condition*);

2) параметр k_g , который можно назвать коэффициентом сопротивления измельчению, обобщающий физико-химические и физико-механические свойства измельчаемого материала; символ g означает «измельчение» (от англ. *grind*).

Коэффициент k_g включает в себя кажущуюся плотность ρ_k , которая учитывает элементар-

ный состав, зольность и влажность топлива. Анализ формулы (12) показал: при постоянных значениях Θ , k_S и D с повышением плотности ρ_k кратность измельчения i повышается, что противоречит здравому смыслу и закону Риттингера. Данное обстоятельство навело на мысль, что коэффициент k_S в (12) должен включать в себя некоторый параметр k_m , Дж/м², отражающий затраты энергии на образование 1 м² поверхности и зависящий от плотности материала, причем в степени $n > 1$, то есть

$$k_S \sim k_m \sim A_k^n. \quad (14)$$

Действительно, анализ приведенных в [12] опытных данных Грюндера, изучавшего измельчение различных материалов (бурый и каменный уголь, стекло и др.), показал, что такая зависимость существует. Обработка данных из [12] в пределах изменения $k_m = 0,5-3,3$ Дж/м² и $\rho_k = 1000-2500$ кг/м³ дала в формуле (14) показатель степени $n = 2,07$ и коэффициент пропорциональности $A = 3 \cdot 10^{-7}$ (при дисперсии аппроксимации $R^2 = 0,997$).

Таким образом, параметр k_m целесообразно включить в коэффициент k_g , который с учетом поправки на влажность k_W можно представить в виде

$$k_g = \frac{6k_m k_W}{\rho_k}. \quad (15)$$

При постоянных значениях Θ и D в формуле (12) с повышением плотности ρ_k коэффициент k_S согласно (14) также повышается (в степенной зависимости от ρ_k). Сопротивление топлива размолу k_g растет, а кратность измельчения i понижается, что соответствует закону Риттингера.

С учетом сказанного

$$k_R = k_S \frac{6}{\rho_k} = \frac{k_g}{k_c}. \quad (16)$$

Уравнение (13) с учетом равенства (16) можно записать так:

$$\Theta = \frac{k_g}{k_c} P_R. \quad (17)$$

В формуле (17) коэффициент k_c находится в знаменателе правой части, так как с увеличением типоразмера мельницы конструктивный параметр k_c также должен повышаться, а удельные затраты энергии на размол Θ (при неизменных значениях k_g и P_R) — снижаться.

Показатель измельчения P_R в уравнениях (13) и (17) однозначно связывает крупность топлива до размола D_s и после него d_s .

При измельчении одного топлива ($k_g = \text{const}$) в условиях $\Theta = \text{const}$ и $k_c = \text{const}$ показатель измельчения $P_R = \text{const}$, то есть

$$P_R = \frac{i_s - 1}{D_s} = \text{const}. \quad (18)$$

Из равенства (18) следует, что

$$i_s = P_R D_s + 1. \quad (19)$$

Анализ уравнения (17) показывает, что при измельчении различных топлив ($k_g \neq \text{const}$) в условиях $\Theta = \text{const}$ и $k_c = \text{const}$ показатель измельчения P_R должен изменяться обратно пропорционально изменению величины k_g .

Экспериментальные исследования закономерностей измельчения топлива

Проверка теоретических зависимостей выполнена на экспериментальном материале, полученном при измельчении различных топлив в лабораторных и промышленных установках.

Измельчение в лабораторных условиях. В серии из 56 опытов, выполненных в ОАО ВТИ, исследовалось измельчение 8 топлив различных марок (каменные и бурые угли, шлам) в вентилируемой лабораторной установке для определения коэффициента размолосопособности по методике [13]. Измельчение воздушно-сухих проб топлива производилось в стальной шаровой барабанной мельнице объемом 1,5 л в течение 15 минут. Масса каждой пробы равнялась 50 г. Исходные пробы топлива состояли из частиц различных классов, для выделения которых использовались сита с размерами ячеек от 0,09 до 3,2 мм. Коэффициент размолосопособности, определенный при стандартной исходной крупности проб (1,25–3,2 мм при $D_s = 2,225$ мм), изменялся в пределах $K_{\text{ло}} = 1,29$ –1,86.

Обработка и представление полученных данных в координатах D_s и $(i_s - 1)$ показала (рис. 2), что в пределах одной марки топлива ($k_g = \text{const}$) при $\Theta = \text{const}$ и $k_c = \text{const}$ закон Риттингера в форме (18) подтверждается, т. е. показатель измельчения $P_R = \text{const}$. В соответствии с уравнением (19) увеличение крупности исходного куска D_s прямо пропорционально повышает кратность его измельчения i_s . С повышением твердости топлива (снижение $K_{\text{ло}}$) кратность из-

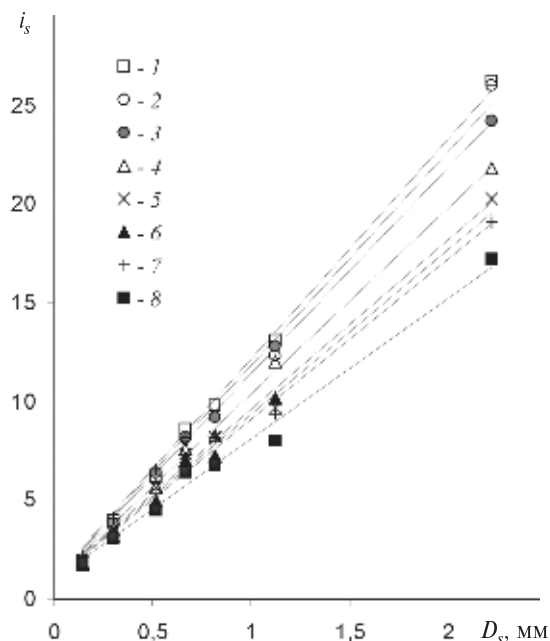


Рис. 2. Кратность измельчения i_s в зависимости от среднего по массе размера D_s частиц в исходной пробе (размол воздушно-сухих углей в лабораторной мельнице по методике [13]): 1 — нерюнгринский СС $K_{\text{ло}} = 1,86$; 2 — подмосковный 2Б $K_{\text{ло}} = 1,77$; 3 — донецкий Т $K_{\text{ло}} = 1,68$; 4 — кузнецкий Г $K_{\text{ло}} = 1,55$; 5 — березовский 2Б $K_{\text{ло}} = 1,44$; 6 — башкирский 1Б $K_{\text{ло}} = 1,4$; 7 — шлам АШ $K_{\text{ло}} = 1,4$; 8 — кузнецкий Т $K_{\text{ло}} = 1,29$

мельчения i_s снижается. Достоверность аппроксимации опытных данных линейными зависимостями (19) для всех топлив находилась в пределах $R^2 = 0,983$ –0,999.

Измельчение в стендовых установках. В 12 опытах, выполненных П. Осокиным [8] на стенде с вентилируемой ММ (ее параметры приведены выше), измельчался экибастузский каменный уголь в воздушно-сухом состоянии ($k_g = \text{const}$ и $k_c = \text{const}$) при различном расходе топлива в мельницу и частоте вращения ротора, т. е. при $\Theta \neq \text{const}$.

Обработка данных из работы [8] показала (рис. 3), что увеличение удельной энергии e , затраченной на размол, повышает кратность измельчения i_s исходного куска D_s и показатель P_R , что подтверждает закон Риттингера в форме (17). Кратность измельчения топлива i_s линейно возрастает с увеличением исходного зерна D_s при $e = \text{const}$, что соответствует уравнению (19).

Следующая серия из 32 опытов, выполненных в топливной лаборатории БелЭНИН, была

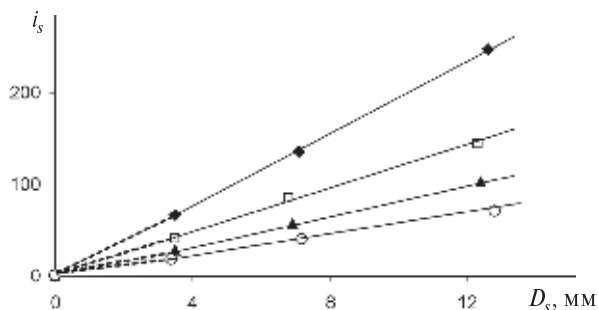


Рис. 3. Изменение кратности измельчения i_s среднего (по массе) исходного куска D_s в зависимости от удельных затрат энергии e (приведены к условной мощности при $u_p = 50$ м/с) при размоле воздушно-сухого экибастузского угля в ММ с инерционным сепаратором на стенде (авторская обработка первичных данных П. Осокина [8]):
 $e \cdot 10^2$, Дж/кг: \blacklozenge — 24,2; \blacksquare — 16,6; \blacktriangle — 8,9; \bullet — 4,6

связана с размолем назаровского бурого угля в вентилируемой стендовой установке с мельницей-вентилятором.

Основу стенда составляет М-В без сепаратора и предвключенная восьмиметровая сушильная шахта. М-В представляет собой копию натурной мельницы М-В 1600/500/980, уменьшенной в 5,33 раза. Основные характеристики мельницы следующие: наружный диаметр колеса $D_2 = 0,3$ м; относительная ширина лопаток $b/D_2 = 0,317$; относительная высота лопаток $h/D_2 = 0,157$; количество лопаток $z = 10$ шт.;

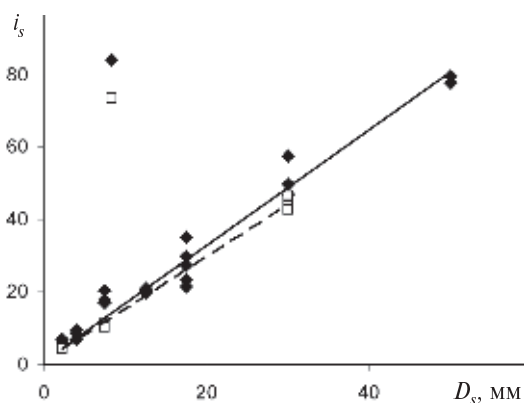


Рис. 4. Изменение кратности измельчения i_s назаровского бурого угля в стендовой М-В при изотермических условиях в зависимости от среднего по массе исходного размера D_s частицы и влажности W :
 \blacklozenge — $W = 13\%$; \blacksquare — $W = 33\%$

окружная скорость на наружном диаметре колеса $u_2 = 82,3$ м/с.

Воздушно-сухой (при $W^{\text{гн}} = 13\%$) и увлажненный (до $W = 32\%$) назаровский бурый уголь марки 2Б измельчался в изотермических условиях. Средние (по массе) размеры исходных кусков D_s изменялись в пределах 2,2–50 мм.

Анализ показал (рис. 4), что кратность измельчения i_s повышается пропорционально увеличению размера куска D_s (причем как для сухого, так и для увлажненного угля), что подтверждает закона Риттингера.

Повышение влажности угля от гигроскопической до близкой к рабочей снижает интенсивность измельчения незначительно. Усредненные показатели измельчения P_R различались в пределах погрешности их определения (около 10%).

Полученный результат принципиально расходится с устоявшимися представлениями о влиянии влаги на размолоспособность топлива и вступает в противоречие с нормативными зависимостями, учитывающими поправки на влажность $P_{\text{вл1}}$ и $P_{\text{вл2}}$.

Измельчение в промышленных условиях.

Испытания промышленной ППС с М-В 1600/600/980 (8 опытов) были проведены при бесси́параторном размоле башкирского бурого угля марки 1Б в режимах газовой и газовоздушной сушки. Проектные характеристики мельницы приведены в [3].

Во время опытов значения отдельных показателей изменялись в следующих пределах: загрузка мельницы топливом $B = 4,2$ –11,4 кг/с; гранулометрический состав исходного топлива (по суммарным остаткам на ситах с размерами ячеек 5 и 10 мм) — $R_5 = 35$ –67%, $R_{10} = 20$ –45%, средний (по массе) и максимальный размеры кусков соответственно $D_s = 8$ –18 мм и D_{max} — до 60 мм при влажности $W_t^r = 56$ –59%; гранулометрический состав продукта измельчения (по суммарным остаткам на ситах с размерами ячеек 90 и 1000 мкм) $R_{90} = 67$ –91%, $R_{1000} = 15$ –31%, максимальный размер зерна $d_{\text{max}} = 4$ –6 мм при влажности $W^{\text{пл}} = 32$ –51%; влагосъем $\Delta W = 0,12$ –0,4 кг/кг; удельный расход электроэнергии на размол $\mathcal{E} = 18,7$ –37,8 кДж/кг.

Кратность измельчения i_s в условиях бесси́параторного размола топлива оказалась низкой и изменялась в пределах 13–24. Как видно на рис. 5, величина i_s уменьшается по мере роста

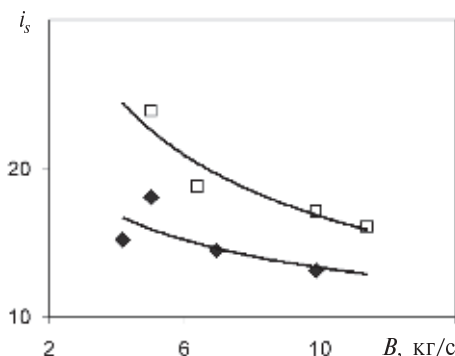


Рис. 5. Изменение кратности измельчения i_s в зависимости от производительности мельницы B при различной исходной крупности топлива:
 ◆ — $D_s = 13,5$ мм; ■ — $D_s = 17,3$ мм

производительности мельницы B и возрастает с повышением исходной крупности топлива D_s .

Показатель измельчения $P_R = (i_s - 1)/D_s$ находился в пределах $860 - 1600 \text{ м}^{-1}$. Удельные затраты энергии на разمول Θ (рис. 6) зависят от показателя P_R линейно (с достоверностью аппроксимации 0,87), что подтверждает закон Риттингера, записанный в виде выражений (13) и (17). Тангенс угла наклона аппроксимирующей линии на рис. 6 равен коэффициенту пропорциональности k_R в уравнении (13); для ППС с М-В 1600/600/980 (без сепаратора) $k_R = 24 \text{ (Дж·м)/кг}$ при $k_c = 2,27$ и $k_g = 54,5$. Таким образом, в широких пределах варьирования топливной нагрузки соотношение Θ/P_R является величиной постоянной и равной коэффициенту k_R .

Подводя итог, можно сформулировать следующие выводы.

1. При измельчении бурых и каменных углей в лабораторной установке (воздушно-сухое топливо), в стендовых установках с моделями быстросходных мельниц (воздушно-сухое и влажное

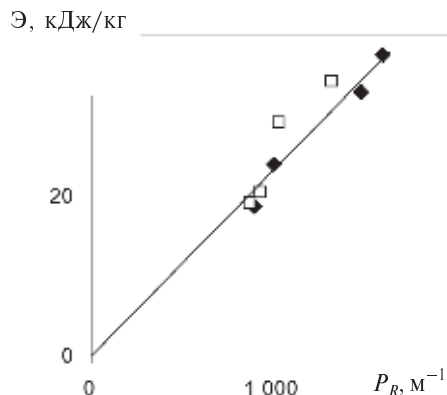


Рис. 6. Зависимость удельной энергии, затраченной на разمول и пневмотранспорт, от показателя измельчения P_R при размоле башкирского бурого угля в ППС без сепаратора с М-В 1600/600/980 в режимах газовой (◆) и газовоздушной (■) суши

топлива) и в промышленной пылесистеме с мельницей-вентилятором без сепаратора экспериментально подтвержден закон Риттингера.

2. Установлено, что кратность измельчения топлива изменяется прямо пропорционально его исходной крупности в диапазоне от 1,5 до 250. Коэффициент пропорциональности — показатель измельчения по Риттингеру — зависит от конструкции измельчителя, размолосопособности топлива и удельной энергии, затраченной на разمول. С ростом топливной нагрузки в промышленных мельницах кратность измельчения снижается. Соотношение Θ/P_R является величиной постоянной и равной коэффициенту Риттингера k_R для всех исследованных топлив.

3. Влажность топлива снижает интенсивность его измельчения в мельнице не более чем на 10 %.

4. Полученные результаты можно рассматривать как обоснование нового подхода, основанного на законе Риттингера, к расчету упрощенных систем пылеприготовления с быстросходными мельницами при углубленном помоле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев, К.А. Исследование подготовки топлива для низкотемпературного вихревого сжигания [Текст] / К.А. Григорьев, Ю.А. Рундыгин, Ф.З. Финкер и др. // Теплоэнергетика. — 1988. № 11. — С. 66–68.
2. Рундыгин, Ю.А. Низкотемпературная вихревая технология сжигания твердых топлив: опыт

внедрения, перспективы использования [Текст] / Ю.А. Рундыгин, К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий // Всерос. науч.-технич. семинар «Новые технологии сжигания твердого топлива: их текущее состояние и использование в будущем» (Москва, 23–24 янв. 2001 г.): Сб. докл. — М.: ВТИ, 2001. — С. 286–295.

3. Расчет и проектирование пылеприготовительных установок котельных агрегатов [Текст]: Нормативные материалы / ЦКТИ–ВТИ.— Рук. указания.— Вып. 32. Л.: ОНТИ ЦКТИ, 1971.— 309 с.
4. **Rittinger, P.R.** Lehrbuch der Aufbereitungskunde [Текст] / P.R. Rittinger.— Berlin, 1867.
5. **Kick, F.** Das Gesetz, der Proportionalen Widerstande und seine Anwendungen [Текст] / F. Kick.— Leipzig, 1885.
6. **Бонд, Ф.С.** Законы дробления [Текст] / Ф.С. Бонд // Труды Европейского совещания по измельчению.— М.: Стройиздат, 1966.— С. 118–134.
7. **Андреев, С.Е.** Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых [Текст] / С.Е. Андреев, В.В. Зверевич, В.А. Перов.— М.: Недра, 1966.— 396 с.
8. **Осокин, В.П.** Молотковые мельницы [Текст] / В.П. Осокин.— М.: Энергия, 1980.— 176 с.
9. **Бауман, В.А.** Роторные дробилки [Текст] / В.А. Бауман.— М.: Машиностроение, 1973.— 271 с.
10. **Вайсберг, Л.А.** Вибрационные дробилки. Основы расчета, проектирования и технологического применения [Текст] / Л.А. Вайсберг, Л.П. Захаровский, В.Я. Туркин // Ред. Л.А. Вайсберг.— СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004.— 306 с.
11. **Ходаков, Г.С.** Физика измельчения [Текст] / Г.С. Ходаков.— М.: Наука, 1972.— 307 с.
12. **Ромадин, В.П.** Пылеприготовление [Текст] / В.П. Ромадин.— М.—Л.: ГЭИ, 1953.— 519 с.
13. **ГОСТ 15489–84.** Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы. Метод определения коэффициента размолоспособности.— М., 1984.

УДК 621.315.1

Н.Ю. Шевченко

АНАЛИЗ ПРОГНОЗИРУЕМЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ПРОВОДА РЕКОНСТРУИРУЕМОГО УЧАСТКА ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Для обеспечения бесперебойной работы воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) в процессе эксплуатации их рассчитывают на воздействие гололедно-ветровых нагрузок, имеющих определенную нормируемую вероятность появления в рассматриваемом районе за время эксплуатации линии. Сочетание значений атмосферных параметров определяет надежность и долговечность ВЛЭП и уровень расходов ресурсов на создание линии.

Для повышения практической ценности в статье представлены результаты расчета ожидаемых механических нагрузок на провода ВЛЭП напряжением 220 кВ. В связи с тем, что эти результаты планируется использовать при реконструкции участков воздушных линий электропередачи на территории Камышинского района, определение воздействующих климатических условий произведено именно для данного региона, относящегося к IV климатическому району по толщине стенки гололеда ($b_{гн} = 25$ мм) и III климатическому району по скорости ветра ($x = 32$ м/с). За исходный вариант принят под-

верженный частым гололедным воздействиям участок длиной 12 км электрической сети напряжением 220 кВ с фазными проводами АС 300/39, опорами ПС-220-3 и пролетом между промежуточными опорами $l_{пр} = 300$ м. Срок службы линии — 35 лет.

Для территории Камышинского района характерно образование гололедно-изморозевых отложений плотностью $0,25–0,6$ г/см³ при температуре воздуха от -2 до -5 °С. Поэтому для расчетов нагрузок при гололедных отложениях была принята плотность $0,25$ г/см³ (изморозь) и $0,9$ г/см (чистый гололед), а также следующие температуры: среднегодовая $t_3 = +15$ °С; низшая температура $t_- = -40$ °С; высшая $t_+ = +40$ °С; при гололеде $t_r = -5$ °С; температура воздуха при нормативном ветровом давлении $t_в = -5$ °С.

Необходимо было оценить степень опасности различных механических перегрузок и выбрать оптимальный вариант реконструкции ВЛЭП, обеспечивающий бесперебойную работу линий в самых тяжелых метеорологических



условиях. Для достижения поставленной цели предложена методика, включающая следующее:

разработку вариантов реконструкции;

выбор критериев эффективности;

механический расчет нагрузок на провода ВЛЭП по [1–3];

расчет ожидаемых механических нагрузок в виде полных тяжений проводов при изменяющихся метеоусловиях, а именно при воздействии температуры Θ , ветровых нагрузок на провод без отложений; нагрузок от отложений без ветра, гололедно-ветровых нагрузок по [4];

построение зависимостей полных тяжений проводов от ряда факторов — от температуры $T_{\Theta} = f(\Theta)$, скорости ветра $T_v = f(v)$ при $t_v = -5^{\circ}\text{C}$, от толщины стенок отложений разной плотности $T_r = f(b_r)$ при $t_r = -5^{\circ}\text{C}$ с ветром и без него;

выбор системы частных критериев;

определение оптимального варианта реконструкции ВЛЭП по многокритериальной модели методом аддитивной свертки.

Разработка вариантов реконструкции. Для повышения эффективности работы ВЛЭП предложено реконструировать в первую очередь те участки линии, которые наиболее часто подвергаются гололедно-ветровым воздействиям. К рассмотрению представлено девять вариантов реконструкции линии:

1) замена металлических решетчатых опор типа ПС 220–3 на металлические многогранные П1С-220-П1 ($l_{пр} = 200$ м);

2) замена опор ПС 220-3 (высота 31 м) на металлические решетчатые опоры П-220-3 высотой 36 м;

3) уменьшение габаритного пролета в два раза ($l_{пр} = 150$ м) за счет подстановки дополнительных опор типа ПС 220-3;

4) замена металлических решетчатых опор типа ПС 220-3 на металлические многогранные П1С-220-П1 и уменьшение габаритного пролета в два раза ($l_{пр} = 100$ м);

5) замена проводов марки АС-300/39 на АС-300/66;

6) замена проводов марки АС-300/39 на АС-400/51;

7) замена проводов марки АС-300/39 на композитные Аego-Z 366;

8) замена проводов марки АС-300/39 на высокотемпературные с зазором GTACSR 310;

9) замена проводов марки АС-300/39 на высокотемпературные классического исполнения TACSR/ACS 310.

Выбор критериев эффективности

Поскольку безопасная работа ВЛЭП лимитируется габаритом линии или обрывом провода, то для проверки эффективности вариантов реконструкции предложены следующие критерии:

полное тяжение в проводе должно быть меньше допустимого значения $T_x < T_{доп}$ при низшей температуре $t_- = -40^{\circ}\text{C}$, максимальной скорости ветра $x = 32$ м/с, нормативной толщине стенок отложений $b_{гн} = 25$ мм;

стрела провиса при изменяющихся климатических воздействиях меньше стрелы провиса провода при высшей температуре $f_x < f_{max}$;

напряжение в проводе при максимальной гололедной (σ_6) или гололедно-ветровой (σ_7) нагрузке не должно превышать допустимое значение: $\sigma_{доп} \geq \sigma_{6x}$ или $\sigma_{доп} \geq \sigma_{7x}$.

Анализ ожидаемых механических нагрузок при изменяющихся метеоусловиях

Анализ ожидаемых эксплуатационных механических нагрузок. В механических расчетах в качестве исходного режима принято состояние ВЛЭП, когда отсутствует воздействие ветра и отложений, при температуре провода $+15^{\circ}\text{C}$. Расчет полного тяжения провода при изменении температуры (T_i) и стрелы провиса произведен с определением механического напряжения в проводах σ_i из уравнения состояния провода (1):

$$\sigma_i = \frac{\gamma_1^2 l_{расч}^2 E}{24 \sigma_i^2} = \sigma_{доп} - \frac{\gamma_1^2 l_{расч}^2 E}{24 \sigma_{доп}^2} - \alpha_{лр} E (t - t_-). \quad (1)$$

Стрела провиса провода равна

$$f_i = \frac{\gamma_1 l_{расч}^2}{8 \sigma_i}. \quad (2)$$

Полные тяжения провода T_i , кгс:

$$T_i = \frac{M_0 10^{-3} l_{расч}}{8 f_i} \sqrt{l_{расч}^2 + 64 f_i^2}. \quad (3)$$

Результаты расчетов по формулам (1)–(3) показали, что при среднегодовой температуре

тяжения в проводах не превышают допустимого значения, а стрелы провиса меньше максимальных, следовательно, в нормальном режиме работы все варианты реконструкции надежно работают. Тяжения в проводах растут при понижении температуры и приближаются к критическим значениям при достижении температуры воздуха $t = -40^\circ\text{C}$ для вариантов с уменьшенным габаритным пролетом до 100 м (металлическая многогранная опора) и для провода АЕРО-Z. Для остальных вариантов реконструкции выполняется условие $T_x < T_{\text{доп}}$. При замене металлической решетчатой опоры на многогранную металлическую пролет между промежуточными опорами уменьшается в 1,5 раза. Для этого варианта реконструкции лимитирующим моментом при температуре $t = +40^\circ\text{C}$ является габарит линии $f_x = f_{\text{max}} = 4,6$ м (табл. 1).

Анализ ожидаемых ветровых нагрузок. Полное тяжение T_x , возникающее в проводах без отложений, но при изменяющейся скорости ветра (0, 10, 20, 30, 40 м/с) и фиксированной температуре воздуха $t_t = -5^\circ\text{C}$ определено по формулам

$$\sigma_v = \frac{\gamma_6 l_{\text{расч}}^2 E}{24 \sigma_v^2} =$$

$$= \sigma_{\text{доп}} - \frac{\gamma_1^2 l_{\text{расч}}^2 E}{24 \sigma_{\text{доп}}^2} - \alpha_{\text{лр}} E(t_t - t_-). \quad (4)$$

Стрелы провеса f_v , м;

$$f_v = \frac{\gamma_6 l_{\text{расч}}^2}{8 \sigma_v}. \quad (5)$$

Полные тяжения провода T_v , кгс:

$$T_v = \frac{l_{\text{расч}}}{8 f_v} \sqrt{(M_0^2 10^{-6} + P_v^2)(l_{\text{расч}}^2 + 64 f_v^2)}, \quad (6)$$

где P_v — давление ветрового потока, кгс;

$$P_v = 6,25 \cdot 10^{-5} \alpha k_i C_x v^2 d_n. \quad (7)$$

По результатам расчетов согласно выражениям (4)–(7) построены зависимости полных тяжений проводов от ветровой нагрузки при фиксированной температуре воздуха $t_t = -5^\circ\text{C}$ (рис. 1). Анализируя графики на рис. 1, а и б, можно сделать вывод, что для всех вариантов реконструкции выполняются условия $T_v < T_{\text{доп}}$; $f_x < f_{\text{max}}$; следовательно, этот режим не является аварийным.

Анализ ожидаемых нагрузок от отложений различных видов и гололедно-ветровых нагрузок. Тяжения T_t , возникающие в проводах без ветра, при фиксированной температуре воздуха $t_e = -5^\circ\text{C}$ и наличии отложений различных видов — чистого гололеда с плотностью $g_0 = 900$ кг/м³ и разной толщиной стенки отложений $b_{\text{г.н}}$ (0, 5, 10, 20, 30, 40, 50 мм), изморози с плотностью $g_0 = 250$ кг/м³ ($b_{\text{г.н}}$ = 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 200, 300, 400 мм) — определены по следующим формулам (8)–(11).

Таблица 1

Влияние температуры воздуха на параметры ВЛЭП

Параметры	Значение параметров в вариантах реконструкции								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип проводов	АС 300/39	АС 300/39	АС 300/39	АС 300/39	АС 300/66	АС 400/51	Аеро-Z	GTACSR	TACSR
Тяжения проводов, кН, при низшей температуре воздуха $t_- = -40^\circ\text{C}$:									
$T_{\text{доп}}$	42,2	42,2	42,2	42,2	55,2	55,1	53,7	52,2	49,6
T_x	25,3	14,3	38,2	42,2	28,0	28,0	53,7	23,0	25,0
Стрелы провеса, м, при высшей температуре $t_+ = +40^\circ\text{C}$:									
f_{max}	4,6	15,8	108,	4,6	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8
f_x	4,6	15	2,5	2	8,1	9	5	7,8	8,2

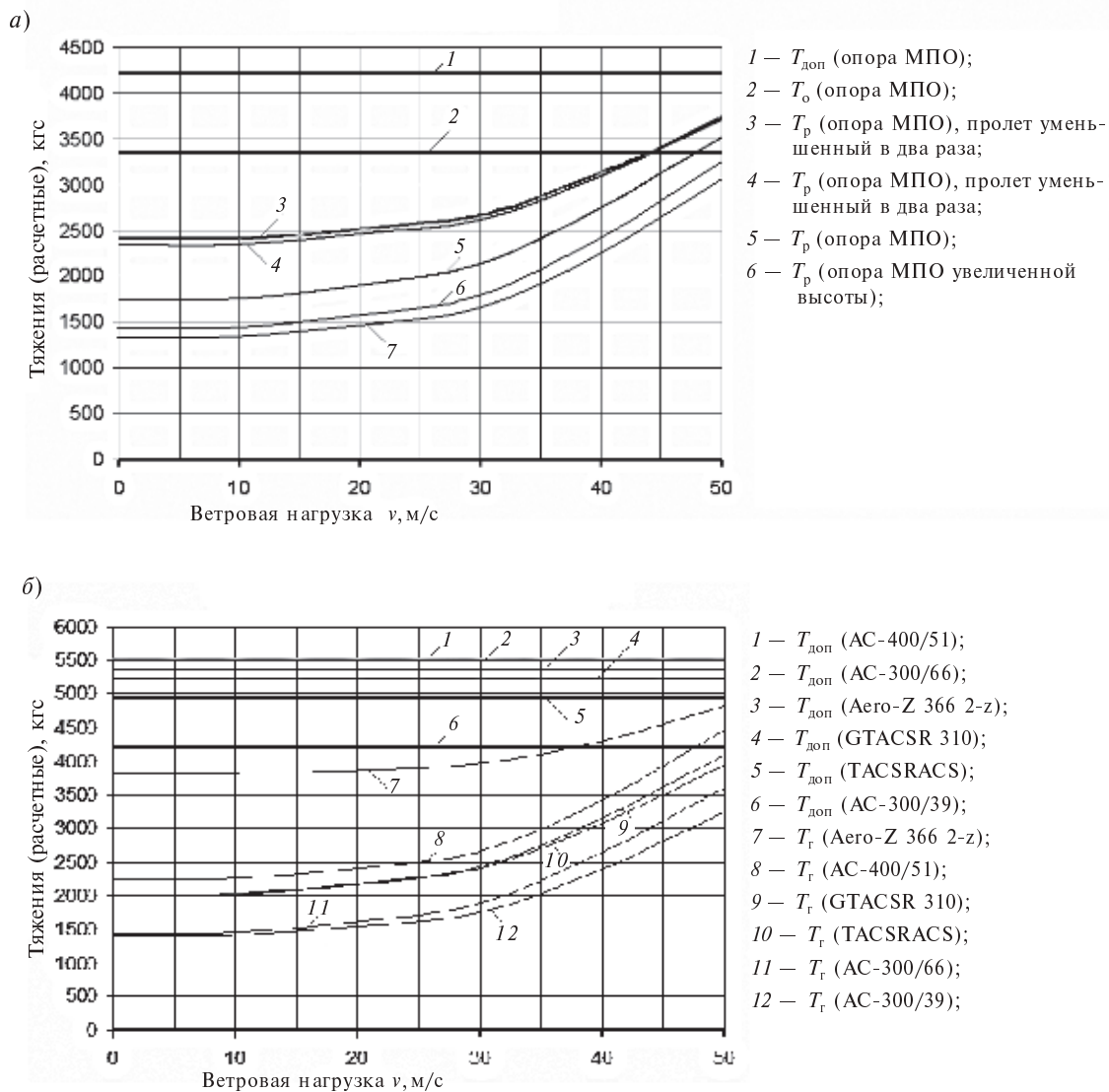


Рис. 1. Графики зависимости величин тяжений проводов без отложений от скорости ветра при фиксированной температуре воздуха $t_r = -5^\circ\text{C}$ для вариантов реконструкции с проводом AC-300 при разных типах опор (а) и с опорами МПО при разных марках проводов (б)

Так как для проводов марок AC, Aero-Z, GTACSR, TACSR/ASC выполняется условие $l_{\text{габ}} > l_{2\text{кр}}$, то уравнение состояния провода имеет вид:

$$\sigma_r - \frac{\gamma_3^2 l_{\text{расч}}^2 E}{24\sigma_r^2} = \sigma_{\text{доп}} - \frac{\gamma_7^2 l_{\text{расч}}^2 E}{24\sigma_{\text{доп}}^2} - \alpha_{\text{лр}} E(t_r - t_3). \quad (8)$$

При этом стрелы провеса f_r , м, равны

$$f_r = \frac{\gamma_3 l_{\text{расч}}^2}{8\sigma_r}, \quad (9)$$

а полные тяжения провода T_r , кг, составляют

$$T_r = \frac{(M_0 10^{-3} + g 10^{-6} F_{\text{отл}} l)}{8f_r} \sqrt{l_{\text{расч}}^2 + 64f_r^2}, \quad (10)$$

где $F_{\text{отл}}$ — площадь поперечного сечения стенок отложений, мм^2 ; вычисляется по формуле

$$F_{отл} = \frac{\pi((d_n + 2b_r)^2 - d_n^2)}{4}. \quad (11)$$

Тяжения $T_{вл}$, возникающие в проводах от действия на них ветра со скоростью $v = 32$ м/с при фиксированной температуре воздуха $t_r = -5^\circ\text{C}$ и плотности отложений $g_0 = 900$ кг/м³ (чистый гололед) при разной их толщине $b_{гн}$ (0, 5, 10, 20, 30, 40, 50 мм) либо изморози с плотностью $g_0 = 250$ кг/м³ ($b_{гн} = 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 200, 300, 400$ мм), рассчитываются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_{вл} - \frac{\gamma_7^2 l_{расч}^2 E}{24\sigma_{вл}^2} = \\ = \sigma_{доп} - \frac{\gamma_1^2 l_{расч}^2 E}{24\sigma_{доп}^2} - \alpha_{лр} E(t_r - t_-). \end{aligned} \quad (12)$$

Стрелы провеса $f_{вл}$, м:

$$f_{вл} = \frac{\gamma_7 l_{расч}^2}{8\sigma_{вл}}, \quad (13)$$

Полные тяжения провода $T_{вл}$, кгс:

$$T_{вл} = \frac{l_{расч}}{8f_{вл}} \times \sqrt{((M_0 10^{-3} + g 10^{-6} F_{отл})^2 + P_v^2)(l_{расч}^2 + 64f_{вл}^2)}. \quad (14)$$

Критические значения толщины стенок отложений в виде изморози и чистого гололеда (b) при фиксированной температуре воздуха $t_r = -5^\circ\text{C}$ представлены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что во всех предложенных вариантах реконструкции выполняется условие эффективности работы в гололедно-ветровых условиях $\sigma_7 < \sigma_{доп}$. Анализируя результаты расчетов, можно сделать вывод, что наименьшей эффективностью при гололедной и гололедно-ветровой нагрузке обладает вариант с увеличенной высотой опоры. Самыми эффективными мероприятиями среди рассматриваемых при реконструкции являются: сокращение пролета в два раза при использовании многогранных металлических опор и замена провода АС на провод марки Аеро-Z.

Выбор системы частных критериев и определение оптимального варианта реконструкции ВЛЭП по многокритериальной модели

Для выбора эффективного мероприятия повышения надежности воздушных линий электропередачи, работающих в экстремальных климатических условиях, необходимо сравнить предложенные варианты реконструкции по нескольким критериям f_q . Так как самые тяжелые последствия вызывают гололедно-ветро-

Таблица 2

Толщина стенки гололеда на проводах

Параметры	Условия	Значения параметров в вариантах реконструкции								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Толщина стенки гололеда b , мм	Без ветра при $t_r = -5^\circ\text{C}$:									
	в виде изморози	65	60	70	90	57	58	78	57	57
	в виде чистого гололеда	27	25	27	35	26	27	38	26	26
	С ветром $v=32$ м/с при $t_r = -5^\circ\text{C}$:									
	в виде изморози	60	65	62	65	52	52	78	52	50
	в виде чистого гололеда	27	24	27	36	26	26	35	28	25
Напряжение в проводе, МПа:	При наибольшей нагрузке									
$\sigma_{доп}$		120	120	120	120	153	120	143	144	139
σ_7		89	115,3	116,2	45	68	62	120	77	93

вые нагрузки, то коэффициент запаса прочности k_n можно рассчитать как отношение предельной толщины стенки гололеда при максимальной скорости и температуре воздуха -5°C к нормируемой толщине стенки гололеда до реконструкции ($b = 20$ мм) [2]. Другими показателями могут служить: снижение потокоотказов $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$; уменьшение времени восстановления поврежденного участка $\Delta t_b = t_{b2} - t_{b1}$; увеличение эксплуатационного коэффициента

запаса прочности $\Delta n = \frac{n_{\varepsilon 2}}{n_{\varepsilon 1}}$, где индекс 1 соответствует параметрам до реконструкции, 2 — после реконструкции.

Оптимальный вариант реконструкции соответствует максимальному значению оценочного функционала \mathcal{E} . При условии равенства коэффициентов важности b_q оценочный функционал имеет вид

$$\mathcal{E} = b_1 \frac{\kappa_n}{\kappa_{n\max}} + b_2 \frac{\Delta n_{\varepsilon}}{\Delta n_{\max/\varepsilon}} + b_3 \frac{\Delta t_b}{\Delta t_{b\max}} + b_4 \frac{\Delta\omega}{\Delta\omega_{\max}} = 0,25 \sum_{q=1}^n b_q \cdot \overline{f_q} \rightarrow \max. \quad (15)$$

Данные расчетов по выражению (15) представлены на диаграмме (рис. 2).

Из рис. 2 следует, что при гололедно-ветровых нагрузках самое эффективное мероприятие для повышения надежности воздушных линий электропередачи по техническим критериям среди рассматриваемых вариантов реконструкции — это сокращение пролета в два раза при использовании многогранных металлических опор (вариант 4). Для окончательного вывода об эффективности вариантов реконструкции необходимо произвести технико-экономический расчет.

В результате проведенной работы достигнуто следующее.

1. Выбрана стратегия повышения надежности воздушной линии электропередачи — частичная реконструкция участков линии, наиболее подверженных гололедно-ветровым воздействиям.



Рис. 2. Оценочный функционал вариантов реконструкции

2. Предложены девять альтернативных вариантов реконструкции линии: замена металлических решетчатых опор на многогранные или решетчатые с повышенной высотой; сокращение габаритного пролета; увеличение сечения или диаметра проводов типа АС; замена сталеалюминевых проводов на композитные типа Аеро-Z либо на высокотемпературные провода типа TACSR и GTACSR.

3. Сформулированы условия формирования факторов экстремальных механических метеовоздействий и определены их параметры для предложенных вариантов реконструкции.

Тяжения в проводах растут с понижением температуры и приближаются к критическим значениям при достижении температуры воздуха -40°C для вариантов с уменьшенным до 100 м габаритным пролетом (опоры ММО) и провода Аеро-Z либо при достижении температуры воздуха -50°C для варианта с уменьшенным до 150 м габаритным пролетом (опоры МРО). Температурное воздействия на провода в диапазоне от -50 до $+50^\circ\text{C}$ не являются аварийно-опасными, но при температуре $+40^\circ\text{C}$ лимитирующим фактором служит габарит провода.

Ветровые воздействия на провода без гололеда не являются аварийно-опасными.

При воздействии на провода отложений в виде чистого гололеда без ветра (при температуре -5°C) при изменении толщины стенки от 0 до 40 мм и при возникновении отложений в виде измороси при изменении толщины стенки от 0 до 70 мм возникает опасность аварии.

Наибольшей надежностью обладают варианты с уменьшенным пролетом у опоры ММО и при замене провода АС на провод Аеро-Z.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Правила** устройства электроустановок [Текст]: изд. 7-е. — М.: НЦ ЭНАС, 2004.
2. **Глазунов, А.А.** Основы механической части воздушных линий электропередачи [Текст] / А.А. Глазунов. — М.: Госэнергоиздат, 1959. — 274 с.: ил.
3. **Дьяков, А.Ф.** Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах [Текст]: учеб. пособие / А.Ф. Дьяков, И.И. Левченко, А.С. Засыпкин, А.А. Аллилуев, Е.И. Сацук. — М.: Издательский дом МЭИ, 2007. — 448 с.: ил.
4. **Кузнецов, П.А.** Анализ ожидаемых механических нагрузок на провода (грозотросы) воздушных линий электропередачи в процессе их эксплуатации [Текст] / П.А. Кузнецов, С.В. Аверьянов // Вестник СГТУ. — 2007. — № 3, вып. 1. — С. 131–140.

УДК 621.314

М.А. Шакиров, В.В. Андрущук, Ван Сынань

ДОСТОВЕРНОСТЬ 2Т-ОБРАЗНОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Как всякая теория, представленная в [1] новая теория трансформаторов нуждается в подтверждениях ее достоверности. Поскольку в центре этой теории лежит 2Т-образная схема замещения трансформатора, то необходимо подтверждение достоверности именно этой модели. Под достоверностью здесь подразумевается соответствие модели опытным данным об объекте (трансформаторе). При этом принимаются во внимание такие свойства трансформатора и явления в нем, на которые практически не влияют или мало влияют допущения, обычно принимаемые при построении его схемных моделей (параллельность линии магнитного потока в окне оси стержня; параболическая форма кривой намагничивания для действующих величин \mathbf{B} и \mathbf{H} ; синусоидальность \mathbf{B} , \mathbf{H} и токов) [1–3].

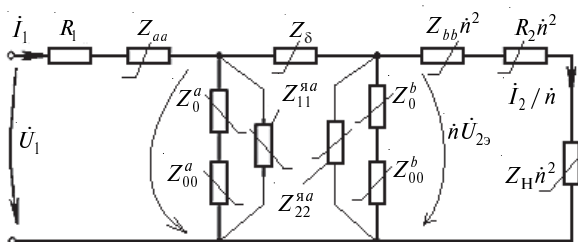


Рис. 1. 2Т-образная схема замещения для установившегося режима трансформатора [2]

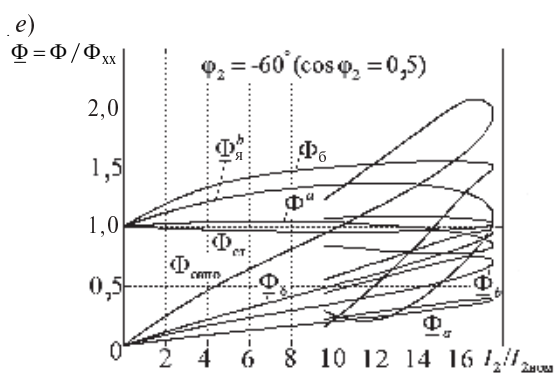
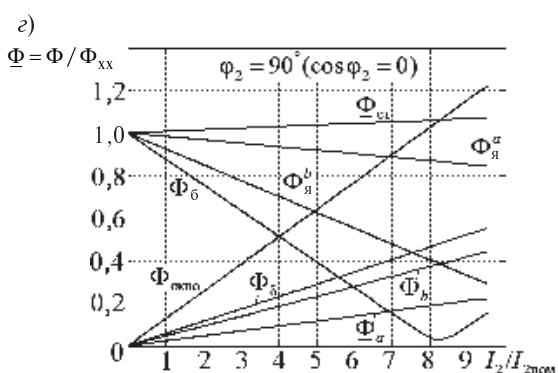
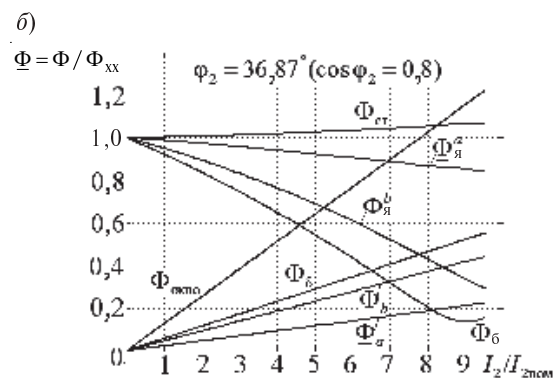
Цель статьи — экспериментальные подтверждения новых свойств в распределении магнитных потоков в трансформаторе, которые теоретически обнаруживаются в результате анализа его 2Т-образной схемы замещения (рис. 1). Эти подтверждения перечисляются под условными названиями достоверность 1, 2 и т. д.

Новые явления демонстрируются на примере численного анализа режимов работы конкретного силового трансформатора с помощью программы *ymagn_sost_2nn.m*, разработанной для расчета 2Т-образной схемы замещения (см. рис. 1) в [2].

Пример. На рис. 2 представлены графики распределения магнитных потоков, полученные с помощью программы *ymagn_sost_2nn.m* для однофазного повышающего броневого трансформатора со следующими каталожными данными: $S_{\text{ном}} = 10/3 = 3,333$ мВА; $U_{\text{HH}} = 11/\sqrt{3} = 6,35$ кВ; $U_{\text{BH}} = 115/\sqrt{3} = 66,4$ кВ; $P_{\text{xx}} = 14/3 = 4,67$ кВт; $I_0 = 0,9\%$ $P_{\text{кз}} = 60/3 = 20$ кВт; $u_{\text{кз}} = 10,5\%$. Конструктивные параметры обмоток (в мм): $d_{\text{ст}} = 436,8$; $h_{\text{обм}} = h_{\text{ст}} = 873,6$; $a_{01} = 30$; $a_1 = 41,9$; $a_{12} = 50$; $a_2 = 62,9$; $a_{22} = 50$; $D_{12} = 630,7$; числа витков обмоток $w_1 = 125$, $w_2 = 1302$ (здесь использованы общепринятые в справочниках и учебниках обозначения [4, 5]). Сечение стержня с учетом его заполнения сталью $s_{\text{Fe}} = 0,135$ м².

Раскрываемые в результате анализа 2Т-образной схемы новые явления следует рассматривать как теоретические предсказания, опытная проверка которых на реальных силовых трансформаторах в условиях вуза затруднительна (практически невозможна). Поэтому для эк-

6)



Кривая намагничивания аппроксимирована параболой степени $n = 15$.

Графики получены с помощью программы *ymagn sost 2nn.m* для 2Т-образной схемы замещения (см. рис. 1)

к значениям, характерным для силовых трансформаторов (см. Приложения 1 и 2). Напомним, что для силовых трансформаторов $\cos \varphi_{K3} \approx 0,05$ [5, с. 296].

Достоверность 1. Важнейший теоретический результат анализа 2Т-образной схемы замещения — обнаружение сверх- и антипотоков в короткозамкнутом трансформаторе. Это следует, в частности, из кривых изменения магнитных потоков в различных частях трансформатора при уменьшении сопротивления нагрузки трансформатора от $Z_H = \infty$ до $Z_H = 0$. Они представлены на рис. 2, где согласно [2] $\dot{\Phi}_{ст}$ — поток в стержне, $\dot{\Phi}_Б$ — суммарный поток боковых ярм, $\dot{\Phi}_{окно}$ — суммарный поток в окне; $\dot{\Phi}$ — поток в зазоре между обмотками; $\dot{\Phi}_я^a$ — поток в стыковом ярме над обмоткой НН; $\dot{\Phi}_я^b$ — поток в стыковом ярме над обмоткой ВН; $\dot{\Phi}_a$ — поток в обмотке НН шириной $a = a_1$; $\dot{\Phi}_b$ — поток в обмотке ВН шириной $b = a_2$.

Эти потоки отнесены к потоку ХХ Φ_0 , поэтому все зависимости потоков в стали начинаются с единицы, а все потоки в окне (воздухе) с нуля. Из кривых рис. 2 следует, что в точке КЗ,

т. е. при $\frac{I_2^{K3}}{I_{2ном}} = \frac{I_1^{K3}}{I_{1ном}} = \frac{1}{u_{K3}} = \frac{1}{0,105} = 9,5238$, значение

$$k_{ст}^{K3внеш} = \frac{\dot{\Phi}_{ст}^{K3внеш}}{\dot{\Phi}_0} = \frac{\dot{\Phi}_{ст}^{K3внеш}}{\dot{\Phi}_0} = 1,0714; \quad (1)$$

$$k_б^{K3внеш} = \frac{\dot{\Phi}_б^{K3внеш}}{\dot{\Phi}_0} = \frac{\dot{\Phi}_б^{K3внеш}}{\dot{\Phi}_0} = -0,1556, \quad (2)$$

Здесь $\dot{\Phi}_б^{K3внеш}$ представлен со знаком минус, так как аргумент $\dot{\Phi}_б$ оказывается близким к 180° [1].

Верхний индекс $K3_{внеш}$ указывает, что в короткозамкнутом состоянии находится внешняя обмотка, т. е. обмотка ВН. Поток (1), превышающий при КЗ поток ХХ, называется сверхпоток, а поток (2) как противоположенный при КЗ потоку ХХ — антипоток. Конечная точка на всех кривых для $\dot{\Phi}_{окно}$ на рис. 2 названа в [6] точкой Г.Н. Александрова, получившего формулу для ее расчета. В [6] также до-

казано (М.А. Шакиров), что для модели Г.Н. Александрова выполняется соотношение

$$k_{окно}^{K3внеш} = \frac{\dot{\Phi}_{окно}^{K3внеш}}{\dot{\Phi}_0} =$$

$$= k_{ст}^{K3внеш} - k_б^{K3внеш} = 1,0714 - (-0,1556) = 1,227;$$

это подтверждается соответствующими кривыми на рис. 2. Достоверность возникновения сверх- и антипотока в короткозамкнутом трансформаторе подтверждается опытами с трансформаторами Тр1 и Тр2, подробно описанными в [3], с приведением соответствующих осциллограмм магнитных потоков.

Достоверность 2. Превращение потока ХХ в боковом ярме в антипоток при КЗ внешней обмотки выглядит, на первый взгляд, противоречивым, поскольку в этом случае напрашивается вывод: амплитуда потока должна при определенной нагрузке принять нулевое значение, что теоретически не имеет места. Последнее подтвер-

ждается кривыми магнитного потока $|\dot{\Phi}_б|$ на рис. 2: видно, что $\dot{\Phi}_б$, становясь в режиме КЗ антипоток, нигде не достигает нулевого значения. Объяснение этого явления иллюстрируется на годографе $\dot{\Phi}_б$ (рис. 3), соответствующем кривой для $\dot{\Phi}_б$ на рис. 2, а.

Как видно, поток $\dot{\Phi}_б$ в действительности становится антипоток в результате изменения его фазы с уменьшением нагрузки R_H . Достоверность этого явления подтверждает рис. 4, на котором представлены осциллограммы, показывающие постепенное смещение фазы потока $\dot{\Phi}_б$ в опытах при изменении активной нагрузки на Тр2 от $R_H = \infty$ до $R_H = 0$.

Совмещение всех осциллограмм на одном графике (рис. 4, е) позволяет получить линию смещения фазы $\dot{\Phi}_б$, построенную по амплитудным точкам осциллограмм.

Достоверность 3. Еще одно новое явление, теоретически предсказываемое с помощью 2Т-образной схемы замещения, — экстремум (минимум) в кривой магнитного потока $|\dot{\Phi}_б|$ в случаях активно-индуктивных нагрузок (рис. 2, б—г). Этот минимум явно просматривается также на годографе $\dot{\Phi}_б$ (рис. 5), соответствующем

кривой для $\dot{\Phi}_6$ на рис. 2, з, полученной при изменении чисто индуктивной нагрузки, т. е. при изменении Z_H от величины $Z_H = j L_H = \infty$ до $Z_H = 0$. На годографе вектор $\dot{\Phi}_6^{KЗвнеш}$ расположен в 3-м квадранте. При этом имеет место случай, когда $|\dot{\Phi}_6| < |\dot{\Phi}_6^{KЗвнеш}|$, что указывает на существование минимума $|\dot{\Phi}_6|$ при изменении индуктивной нагрузки. На годографе (рис. 5) вектор $\dot{\Phi}_6$ с наименьшим значением $|\dot{\Phi}_6|$ расположен в 4-м квадранте.

Достоверность этого явления подтверждается осциллограммами потока $\dot{\Phi}_6$ (рис. 6), полученными в экспериментах с Тр2 при изменении индуктивной нагрузки от $Z_H = j\omega L_H = \infty$ до $Z_H = j\omega L_H = 0$.

В качестве индуктивной нагрузки использовалась одна из секций описанной в [3] катушки с раздвижным сердечником. Осциллограммы рис. 6 показывают, что в процессе изменения индуктивной нагрузки амплитуда потока, сменяясь по фазе, вначале уменьшается, а затем растет, превращаясь в амплитуду антипотока. Линия, иллюстрирующая смещение фазы потока $\dot{\Phi}_6$, представлена на рис. 6, е.

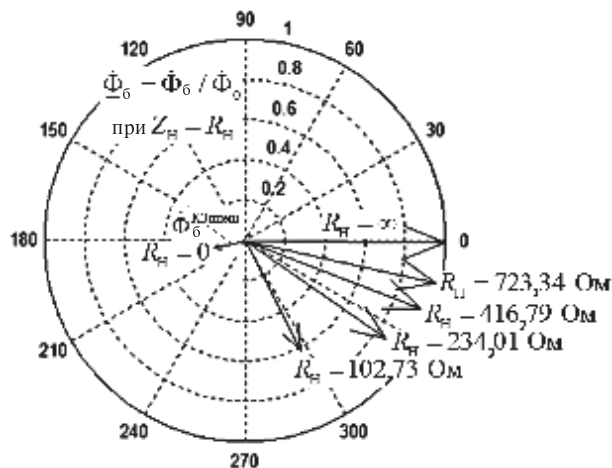


Рис. 3. Годограф векторов магнитного потока $\dot{\Phi}_6$ повышающего трансформатора при изменении активной нагрузки в пределах от $R_H = 0$ до $R_H = \infty$, полученный по 2Т-образной схеме замещения (рис. 1) с помощью программы *ymagn_sost_2nn.m*

Аналогичные доказательства достоверности 2Т-образных схем замещения получены и для понижающего трансформатора.

Итоги проделанной работы можно выразить в следующих выводах:

1. Ни одна из известных электрических схем замещения трансформатора не объясняет воз-

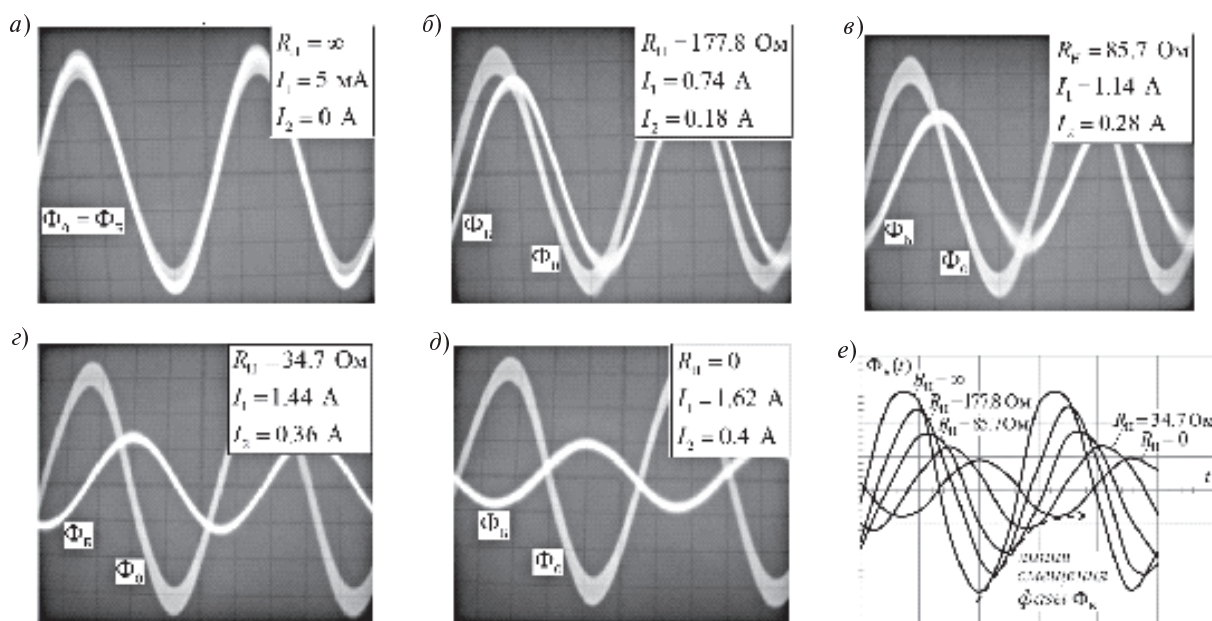


Рис. 4. Превращение потока бокового яра $\dot{\Phi}_6$ в антипоток в повышающем трансформаторе Тр2 при изменении нагрузки от $R_H = \infty$ до $R_H = 0$ (частота 1000 Гц, $U_1 = U_{внут} = 10В$)

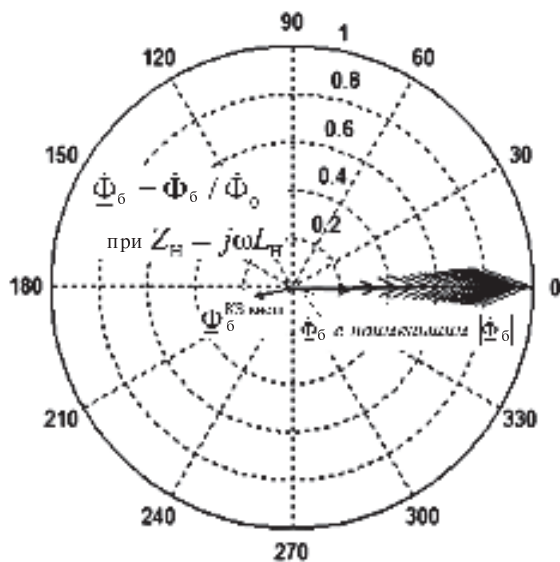


Рис. 5. Годограф векторов магнитного потока Φ_6 повышающего трансформатора при изменении индуктивной нагрузки в пределах от $Z_H = j\omega L_H = \infty$ до $Z_H = j\omega L_H = 0$, полученный по 2Т-схеме (рис. 1) с помощью программы *ymagn_sost_2nn.m*.

никновение сверх- и антипотоков в короткозамкнутых трансформаторах, кроме электрической 2Т-образной схемы замещения. Совместимость электрической 2Т-образной схемы замещения с указанными явлениями — важнейший аргумент

в пользу ее достоверности с учетом обычно принимаемых допущений. Эта совместимость рассматривается как достоверность 1.

2. Трудности организации опытной проверки указанных явлений на мощных трансформаторах в изложенных исследованиях решались косвенным путем: теоретические обоснования новых явлений получены в результате анализа и расчета 2Т-образной схемы замещения реального силового трансформатора, а их достоверность — подтверждена экспериментально на настольных макетных образцах Тр1 и Тр2, достоинство которых — простота изготовления и возможность проверки всех описанных опытов.

3. Важное доказательство достоверности 2Т-образной схемы — соответствие найденных с ее помощью годографов изменения магнитных потоков с осциллограммами, полученными в результате испытаний трансформаторов Тр1 и Тр2 при изменениях нагрузки. Осциллограммы, иллюстрирующие превращение потока в антипоток при изменении активной нагрузки, рассматриваются как достоверность 2, а при изменении индуктивной нагрузки — как достоверность 3.

4. Главный аргумент, подтверждающий достоверность 2Т-образной схемы замещения, — это сам ее вывод [1], полностью лишенный (в рамках общепринятых допущений) каких-либо предвзятостей, характерных для классической

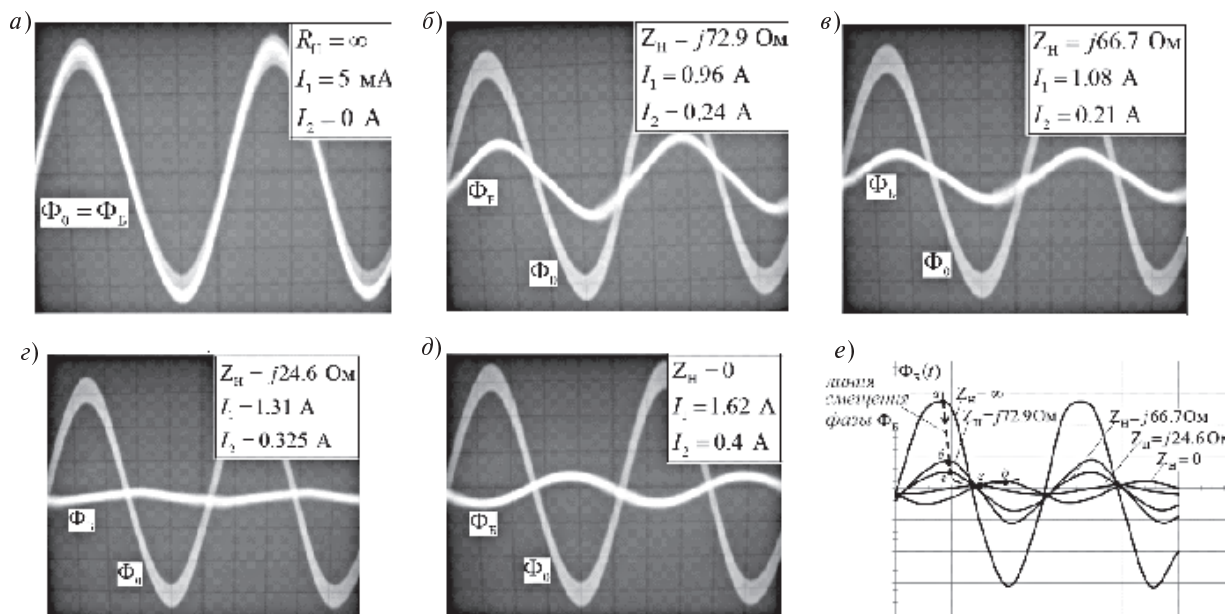


Рис. 6. Превращение потока бокового яра Φ_6 в антипоток в повышающем трансформаторе Тр2 при изменении индуктивной нагрузки от $Z_H = \infty$ до $Z_H = 0$ (частота 1000 Гц, $U_1 = U_{\text{внут}} = 10\text{В}$)



теории трансформаторов, таких, как гипотетический «основной», или «результурующий», поток Φ_0 , «ток намагничивания», «МДС намагничивания, создающая поток Φ_0 », которые для режима КЗ лишены смысла. Если в классической теории первичными являются эвристические (воображаемые) представления о «результу-

тирующих» потоках и «создающих их МДС», а схема замещения (Т-схема) — вторична, то в новой теории наоборот — первична физическая магнитоэлектрическая схема замещения и эквивалентная ей 2Т-образная схема замещения, и потоки не декларируются, а определяют в результате анализа этих моделей.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Расчет сопротивления КЗ трансформатора Тр1. Согласно [1] формула для расчета индуктивности КЗ трансформатора с concentрическими круглыми обмотками со стороны внутренней обмотки имеет вид

$$L_{КЗ} = \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{h} \times \left[D_\delta \left(\delta + \frac{a+b}{3} \right) + \frac{b-a}{3} \left(\delta + \frac{(b+a)}{2} \right) \right], \quad (\text{П1})$$

где h — высота окна трансформатора. Однако, поскольку сечение сердечника Тр1 прямоугольное (рис. П1), то обмотки не могут быть круглыми.

Для расчета $L_{КЗ}$ в этом случае следует воспользоваться следующей формулой

$$L_{КЗ} = \frac{\mu_0 w_1^2}{h} D \left(\delta + \frac{a+b}{3} \right), \quad (\text{П2})$$

где D — периметр прямоугольника, построенного по средней линии зазора между обмотками (рис. П1):

$$D = 2(D_\delta + D'_\delta), \quad (\text{П3})$$

где

$$D_\delta = D_{ст} + 2\delta_1 + 2a + \delta, \quad (\text{П4})$$

$$D'_\delta = D'_{ст} + 2\delta_1 + 2a + \delta. \quad (\text{П5})$$

Для трансформатора Тр1 имеем

$$D = 56 + 2 \cdot 3 + 2 \cdot 10 + 0,9 = 82,9 \text{ мм},$$

$$D'_\delta = 82 + 2 \cdot 3 + 2 \cdot 10 + 0,9 = 108,9 \text{ мм}.$$

Здесь значения промежутка между обмотками Тр1 принято равным ширине провода обмоток, т. е. $\delta = 0,9$ мм. По формуле (П3) находим

$$D = 2(82,9 + 108,9) = 383,6 \text{ мм}.$$

Согласно (П2) индуктивность КЗ со стороны внутренней обмотки Тр1 ($w_1 = 535$)

$$L_{КЗ} = \frac{\mu_0 535^2}{0,09} 0,3836 \times \left(0,0009 + \frac{0,01 + 0,003}{3} \right) = 0,008 \text{ Гн}.$$

Индуктивное сопротивление КЗ Тр1 со стороны его внутренней обмотки на частоте $f = 1000$ Гц

$$x_{КЗ}^{\text{расч}} = 2\pi f L_{КЗ} = 2\pi \cdot 10^3 \cdot 0,008 = 50,27 \text{ Ом}.$$

Активное сопротивление КЗ со стороны внутренней обмотки по данным измерений на постоянном токе, представленным в [3], равно

$$R_{КЗ} = R_{\text{внут}} + \left(\frac{w_{\text{внут}}}{w_{\text{внеш}}} \right)^2 R_{\text{внеш}} = 2,75 + \left(\frac{535}{161} \right)^2 1,25 = 16,6 \text{ Ом}.$$

Следовательно, расчетное значение сопротивления КЗ Тр1 со стороны внутренней обмотки равно

$$Z_{КЗ}^{\text{расч}} = \sqrt{R_{КЗ}^2 + (x_{КЗ}^{\text{расч}})^2} = \sqrt{16,6^2 + 50,27^2} = 52,94 \text{ Ом}.$$

Согласно опытным данным, приведенным в [3, рис. 2, а], для случая КЗ внешней обмотки

$$Z_{КЗ}^{\text{опыт}} = \frac{U_{\text{внут}}^{\text{КЗ}}}{I_{\text{внут}}} = \frac{33}{0,64} = 51,56 \text{ Ом}.$$

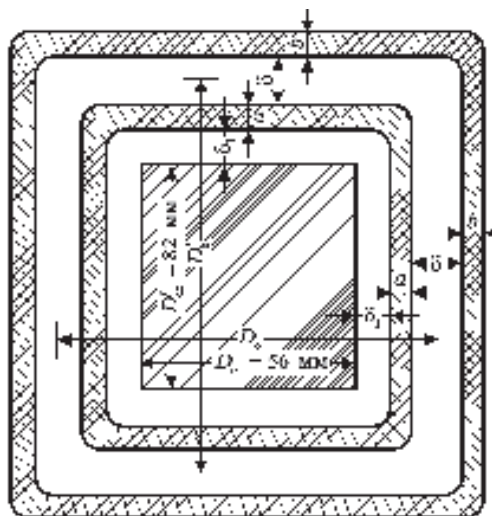


Рис. П1. Сечение сердечника и обмоток трансформаторов Тр1 и Тр2

Таким образом, ошибка расчетного сопротивления КЗ составляет

$$\Delta Z_{\text{КЗ}} = \frac{Z_{\text{КЗ}}^{\text{расч}} - Z_{\text{КЗ}}^{\text{опыт}}}{Z_{\text{КЗ}}^{\text{опыт}}} = \frac{52,94 - 51,56}{51,56} = 2,7\%.$$

Расчет сопротивления КЗ трансформатора Тр2. Согласно (П3)–(П5) для трансформатора Тр2 имеем

$$D_{\delta} = 56 + 2 \cdot 3 + 2 \cdot 3 + 0,9 = 68,9 \text{ мм};$$

$$D_{\delta}' = 82 + 2 \cdot 3 + 2 \cdot 3 + 0,9 = 94,9 \text{ мм};$$

$$D = 2(68,9 + 94,9) = 327,6 \text{ мм}.$$

Индуктивность КЗ со стороны внутренней обмотки ($w_1 = 162$) находим по формуле (П2):

$$L_{\text{КЗ}} = \frac{\mu_0 162^2}{0,09} 0,3276 \times$$

$$\times \left(0,0009 + \frac{0,003 + 0,012}{3} \right) = 7,08 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}.$$

Индуктивное сопротивление КЗ Тр2 со стороны его внутренней обмотки на частоте $f = 1000$ Гц

$$x_{\text{КЗ}}^{\text{расч}} = 2\pi f L_{\text{КЗ}} = 2\pi \cdot 10^3 \cdot 7,08 \cdot 10^{-4} = 4,45 \text{ Ом}.$$

Активное сопротивление КЗ со стороны внутренней обмотки по данным результатов измерений на постоянном токе [3]

$$R_{\text{КЗ}} = R_{\text{внут}} + \left(\frac{w_{\text{внут}}}{w_{\text{внеш}}} \right)^2 R_{\text{внеш}} =$$

$$= 0,7 + \left(\frac{162}{648} \right)^2 3,4 = 0,91 \text{ Ом}.$$

Расчетное значение сопротивления КЗ Тр2 со стороны внутренней обмотки

$$Z_{\text{КЗ}}^{\text{расч}} = \sqrt{R_{\text{КЗ}}^2 + \left(x_{\text{КЗ}}^{\text{расч}} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{0,91^2 + 4,45^2} = 4,54 \text{ Ом}.$$

Согласно опытным данным, приведенным в [3, рис. 3,б], для случая КЗ внешней обмотки

$$Z_{\text{КЗ}}^{\text{опыт}} = \frac{U_{\text{внут}}^{\text{КЗ}}}{I_{\text{внут}}} = \frac{10}{1,64} = 6,09 \text{ Ом}.$$

Ошибка расчетного сопротивления КЗ составляет

$$\Delta Z_{\text{КЗ}} = \frac{Z_{\text{КЗ}}^{\text{опыт}} - Z_{\text{КЗ}}^{\text{расч}}}{Z_{\text{КЗ}}^{\text{опыт}}} = \frac{6,09 - 4,54}{6,09} = 25\%.$$

Значительное расхождение опытных и расчетных значений КЗ для Тр2 объясняется скорее все-

го неточными значениями геометрических параметров обмоток. Расчетное значение $\cos \varphi_{\text{КЗ}}$ без учета потерь в стали

$$\cos \varphi_{\text{КЗ}}^{\text{расч}} = \frac{R_{\text{КЗ}}}{Z_{\text{КЗ}}^{\text{расч}}} = \frac{16,6}{52,94} = 0,31.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Расчетное значение $\cos \varphi_{\text{КЗ}}$ без учета потерь в стали

$$\cos \varphi_{\text{КЗ}}^{\text{расч}} = \frac{R_{\text{КЗ}}}{Z_{\text{КЗ}}^{\text{расч}}} = \frac{0,91}{4,54} = 0,2.$$

При включении рассматриваемой темы в комплекс лабораторных работ студенты должны снять характеристику ХХ (ХХХ) трансформатора. На рис. П2 представлена ХХХ Тр1 и Тр2, доступная для построения в условиях оснащения лаборатории кафедры ТОЭ.

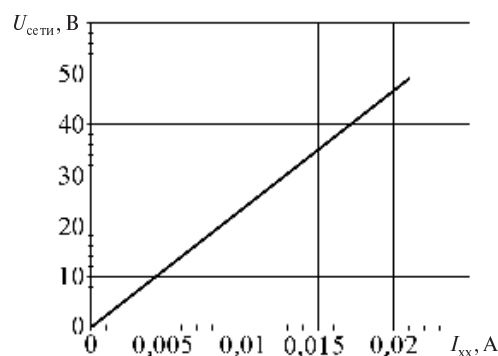


Рис. П2. Характеристика ХХ Тр1 со стороны внешней обмотки ($w = 161$) и Тр2 со стороны внутренней обмотки ($w = 162$) на частоте 1000 Гц

Поскольку установка не дает возможности получить напряжение $U_{\text{сети}}$ больше 50 В, то Тр1 и Тр2 работают при всех испытаниях на линейной части кривой намагничивания. При этом амплитуда индукции в стержне на частоте $f = 1000$ Гц и напряжении $U_1 = 49$ В, приложенном к обмоткам с наименьшим числом витков, в обоих трансформаторах

$$B_m \approx \frac{\sqrt{2} U_{\text{сети}}}{\omega w_{\text{наим}} S_{\text{Fe}}} =$$

$$= \frac{\sqrt{2} \cdot 49}{2\pi \cdot 1000 \cdot 161 \cdot (56 \cdot 82 \cdot 10^{-6})} = 0,015 \text{ Тл}.$$

Напряженность поля в магнитопроводе Тр2 в этом случае, т. е. при ХХ,



$$H_m = \frac{\sqrt{2} w_{\text{наим}} I_{\text{XX}}}{l_{\Sigma}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 161 \cdot 0,0251}{0,348} = 16,4 \text{ А/м},$$

где l_{Σ} — суммарная длина линии напряженности в Тр2, равная

$$l_{\Sigma} = 2 \left(l_{\text{стык}} + h_{\text{окно}} + \frac{D_{\text{ст}}}{2} \right) = \\ = 2 \left(51 + 95 + \frac{56}{2} \right) = 348 \text{ мм}.$$

Здесь через $l_{\text{стык}}$ обозначена длина верхней части стыкового яра

$$l_{\text{стык}} = \frac{D_{\text{ст}}}{2} + \delta_1 + a + \delta + b + \delta_2 = \\ = \frac{56}{2} + 3 + 3 + 0 + 12 + 5 = 51 \text{ мм}.$$

Модуль относительной магнитной проницаемости при ХХ в Тр2 равен

$$\mu_r = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} = \frac{0,015}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 16,4} = 727.$$

Аналогичное значение μ_r получаем и для трансформатора Тр1.

З а м е ч а н и е. То обстоятельство, что отдельные участки трансформатора могут при КЗ иметь потоки соизмеримые с потоком ХХ (при одинако-

вом напряжении на сетевой обмотке) означает, что потери в стали трансформатора при КЗ и ХХ также будут соизмеримыми величинами. Это подтверждается в эксперименте с Тр2 при питании его со стороны внутренней обмотки ($w_1 = 162$) напряжением $U_1 = 10$ В на частоте $f = 500$ Гц. При ХХ потребляемая мощность $P_0 = 0,05$ Вт, ток $I_0 = 0,0028$ А и потери в стали

$$P_{\text{Fe}}^{\text{XX}} = P_0 - R_1 I_0^2 = 0,05 - 0,7 \cdot 0,0028^2 \approx \\ \approx P_0 = 0,05 \text{ Вт}.$$

При КЗ потребляемая мощность $P_{\text{КЗ}} = 0,21$ Вт, ток $I_{\text{КЗ}} = 0,36$ А и потери в стали

$$P_{\text{Fe}}^{\text{КЗ}} = P_{\text{КЗ}} - \left[R_1 + R_2 \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 \right] I_{\text{КЗ}}^2 = \\ = 0,21 - \left[0,7 + 3,4 \left(\frac{162}{648} \right)^2 \right] 0,36^2 = 0,09 \text{ Вт}.$$

Как видно, при $U_1 = 10$ В потери в стали при КЗ оказались даже больше потерь в стали при ХХ. Подтвержденную экспериментом соизмеримость потерь в стали при ХХ и КЗ трансформатора при одном и том же напряжении сетевой обмотки можно принять в качестве дополнительной достоверности 4 относительно 2Т-образной схемы замещения трансформатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шакиров, М.А. 2Т-образные схемы замещения трансформаторов [Текст] / М.А. Шакиров // Электричество. — 2010. № 5. — С. 19–36.
2. Шакиров, М.А. Уточненная 2Т-образная схема замещения трансформатора [Текст] / М.А. Шакиров, Ван Сынань. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: «Наука и образование». — 2010. № 4. С. 79–91.
3. Шакиров, М.А. Аномальные магнитные потоки в двухобмоточном трансформаторе при коротком замыкании [Текст] / М.А. Шакиров, В.В. Андрушук, Дуань

Лион // Электричество. — 2010. № 3. — С. 55–63.

4. Электротехнический справочник: В 3 т. [Текст] / Под ред. В.Г. Герасимова, П.Г. Грудинского, Л.А. Жукова [и др.]; 6-е изд., испр. и доп. Т. 2: Электротехнические устройства. — М.: Энергия, 1981. 640 с.

5. Вольдек, А.И. Электрические машины [Текст] / А.И. Вольдек. — Л.: Энергия, 1974.

6. Александров, Г.Н. Трансформаторы и реакторы. Новые идеи и принципы [Текст] / Г.Н. Александров, М.А. Шакиров. — СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2006.

УДК 621.314

М.А. Шакиров, Ван Сынань

УТОЧНЕННАЯ 2Т-ОБРАЗНАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Классическая теория трансформаторов, излагаемая в учебниках, справочниках, монографиях [1], базируется на физической гипотезе о результирующем, общем, главном магнитном потоке Φ_0 трансформатора и о результирующей МДС

\vec{F}_0 , создающей этот поток. Из уравнений для этих величин выводят Т-образную схему замещения трансформатора, которая, таким образом, является следствием предвзятых представлений, играющих в классической теории первичную роль.

Эти представления, удобные для начального ознакомления с передачей энергии через трансформатор в номинальном режиме, оказываются непригодными для анализа процессов в аномальных режимах, включая режим короткого замыкания (КЗ). Абсурд состоит в ошибочном, основанном на Т-образной схеме замещения утверждении, что в режиме КЗ поток в магнитопроводе равен либо $\dot{\Phi}_0 / 2$ [1, с.335], либо «почти нулю» [2, с. 75]. В новой теории трансформаторов, изложенной в [3], первичную роль играет магнитоэлектрическая схема замещения (МЭСЗ), в которой явно представлены магнитные сопротивления всех основных участков магнитопровода и окна трансформатора. При этом магнитные потоки определяются не предсказанием их величин и путей замыкания, а прямым расчетом МЭСЗ или эквивалентной ей электрической 2Т-образной схемы замещения. В противовес классической из новой теории следует, что в режиме КЗ потоки в отдельных частях магнитопровода, во-первых, различны, во вторых, могут превышать поток холостого хода (ХХ) $\dot{\Phi}_0$ и, в третьих, — быть направленными навстречу друг другу, что подтверждается экспериментально и может быть проверено в условиях типовых лабораторий вузов [4, 5].

Разработанная в [3] 2Т-образная схема замещения получена при упрощенном учете магнитного сопротивления стыковых ярм путем искусственного увеличения магнитного сопротивления участка стержня и участка бокового ярма двухобмоточного трансформатора (рис. 1, а).

Их длины были попросту увеличены на протяженности примыкающих к ним частей стыковых ярм до точек p и q , находящихся напротив середины воздушного канала между обмотками низшего напряжения (НН) (токи показаны крестиками) и высшего напряжения (ВН) (токи показаны точками). Таким образом, в 2Т-схеме [3] магнитные сопротивления стыковых ярм учитывались приближенно путем их добавления к магнитным сопротивлениям стержня и боковых ярм. Однако, как показали расчеты, проведенные по этой схеме замещения, в некоторых режимах работы трансформатора магнитные потоки $\dot{\Phi}_я^a$

и $\dot{\Phi}_я^b$ участков в окрестности точек p и q стыковых ярм могут превышать поток холостого хода $\dot{\Phi}_0$ и, следовательно, насыщения здесь будут от-

личны от насыщений стержня и боковых ярм, что не может быть учтено в 2Т-схеме замещения.

Цель работы — уточнение 2Т-образной схемы замещения путем явного представления в магнитной цепи нелинейных магнитных сопротивлений, соответствующих участкам стыковых ярм вблизи точек p и q . Предлагаемая схема кратко именуется 2ТУ-образной схемой замещения (аббревиатура У от слова *уточненная*).

Основные допущения. В соответствии с принятой традицией рассматривается однофазный двухобмоточный броневого трансформатора с магнитными шунтами в стыковых ярмах с учетом всех пяти допущений, перечисленных в [3]. В отличие от упрощенного подхода [3] на рис. 1, а в стыковых ярмах над каждой обмоткой выделено по два участка: участки $p_{ст}p_a$ и p_ap над обмоткой НН и участки pp_b и p_bp_b над обмоткой ВН. Аналогичные участки $q_{ст}q_a$ и q_aq , а также qq_b и q_bq_b выделены под обмотками. Суммарная длина этих участков $l_{стык} = \alpha l_{\Sigma}$, где l_{Σ} — общая протяженность магнитопровода трансформатора. Комплексные магнитные сопротивления участков стыковых ярм, примыкающих к середине межобмоточного пространства, показаны на МЭСЗ (рис. 1, б) зачерненными и обозначены через $Z_{я}^{Ma}$ и $Z_{я}^{Mb}$. В них можно учесть также магнитные сопротивления окружающей стыковые ярма части воздушного пространства до бака.

Комплексные магнитные сопротивления участков стыковых ярм от стержня до точек p_a и q_a по-прежнему учитываются в комплексном магнитном сопротивлении стержня $Z_{ст}^M$, так же как и аналогичные сопротивления между боковыми ярмами и точками p_b и q_b учитываются в комплексном магнитном сопротивлении бокового ярма Z_6^M (рис. 1, б).

Кривые намагничивания нелинейных магнитных сопротивлений участков магнитопровода аппроксимируются уравнением параболы степени n :

$$\Phi = (AU^M)^{1/n}.$$

Способ определения параметра параболы A при заданном n изложен в [3]. В данной работе принято $n=15$ и все расчеты по 2ТУ-образной

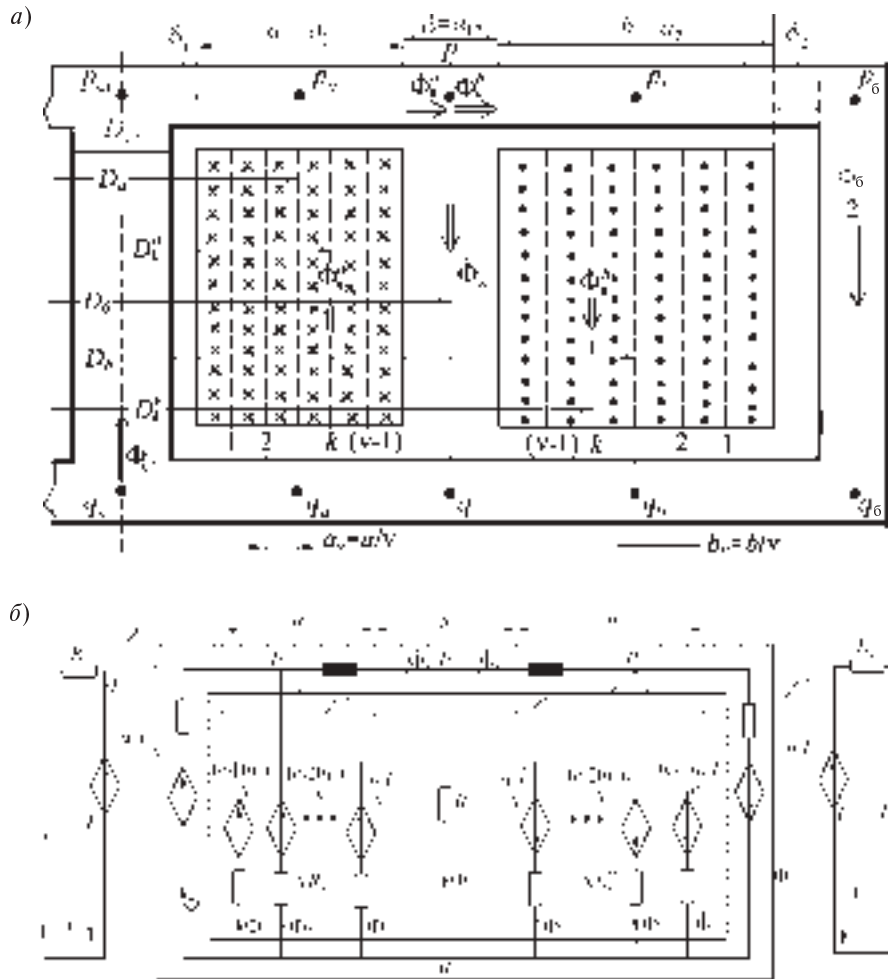


Рис. 1. Обмотки броневого трансформатора (а) и его первичная магнитоэлектрическая схема замещения (МЭЗС) (б); зачерненными показаны магнитные сопротивления стыковых ярем

схеме замещения представлены для того же однофазного броневого трансформатора, который рассматривался в [3].

Как и в [3], вывод электрической схемы замещения базируется на естественной для трансформатора первичной МЭЗС (рис. 1, б), где каждая из обмоток разбита на v элементарных последовательно включенных тонких слоев. Воздушные каналы между этими слоями отображены на рис. 1, б соответствующими ветвями с магнитными сопротивлениями ΔR_k^{Ma} и ΔR_k^{Mb} .

Преобразование первичной МЭЗС в эквивалентную электрическую 2ТУ-образную схему. Рассматриваемое преобразование представим отдельными этапами, часть из которых вкратце повторяет этапы преобразований из [3].

Этап 1. Объединение $v-1$ ветвей с магнитными сопротивлениями ΔR_k^{Ma} в одну эквивалентную (R_a^M, \dot{F}_a) -ветвь. Это преобразование не отличается от приведенного в [3], где было показано, что при $v \rightarrow \infty$ имеем (рис. 2, а)

$$\dot{F}_a = \left(\frac{1}{2} - \frac{a}{D_a} \right) w_1 \dot{I}_1; \quad R_a^M = \frac{h}{\mu_0 a \pi D_a}. \quad (1)$$

При этом для ЭДС \dot{E}_1 было получено следующее выражение:

$$\dot{E}_1 = j\omega w_1 \times \left[\dot{\Phi}_я^a - \left(\frac{1}{2} + \frac{a}{6D_a} \right) \dot{\Phi}_a + \left(1 - \frac{a^2}{3D_a^2} \right) \frac{w_1 \dot{I}_1}{12R_a^M} \right]. \quad (2)$$

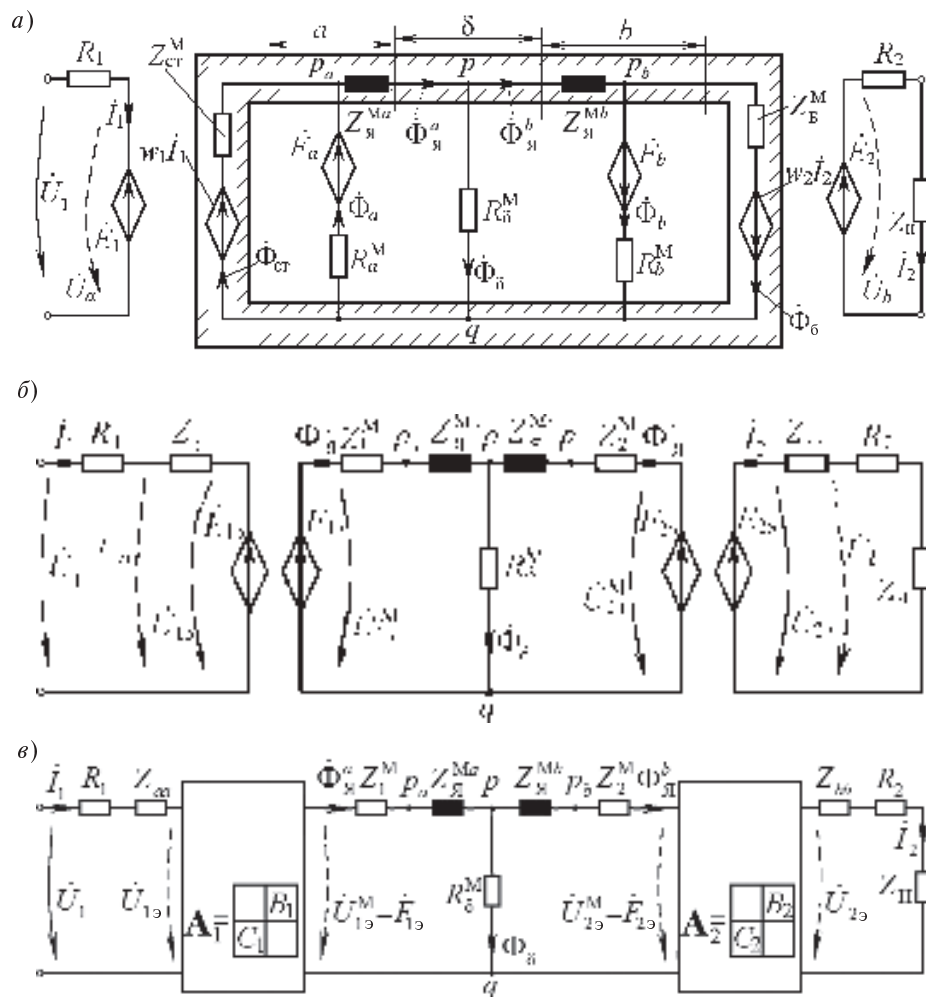


Рис. 2. Трансфигурации первичной МЭСЗ:

- а — замена магнитных сопротивлений окна ветвями (R_a^M, \dot{F}_a) и (R_b^M, \dot{F}_b);
 б — объединение ветвей с МДС; в — представление МЭСЗ с использованием 2×2 -полюсников, инвертирующих электрическую энергию в магнитную и наоборот

Преобразуя аналогичным образом $v-1$ параллельные магнитные ветви с сопротивлениями ΔR_k^{Mb} , получим эквивалентную магнитную (R_b^M, \dot{F}_b)-ветвь (рис. 2, а). В [3] показано, что при $v \rightarrow \infty$:

$$\dot{F}_b = \left(\frac{1}{2} + \frac{b}{D_b} \right) w_2 \dot{I}_2; \quad R_b^M = \frac{h}{\mu_0 b \pi D_b}, \quad (3)$$

и ЭДС \dot{E}_2 может быть представлена в виде

$$\dot{E}_2 = j\omega w_2 \times \left[\dot{\Phi}_b - \left(\frac{1}{2} - \frac{b}{6D_b} \right) \dot{\Phi}_b + \left(1 - \frac{b^2}{3D_b^2} \right) \frac{w_2 \dot{I}_2}{12R_b^M} \right]. \quad (4)$$

Этап 2. Замена параллельных (R_a^M, \dot{F}_a)-ветви и ($Z_{ст}^M, w_1 \dot{I}_1$)-ветви эквивалентной ($Z_1^M, \dot{F}_{1э}$)-ветвью (рис. 2, б). В [3] было получено

$$\dot{F}_{1э} = \xi_{ст1} w_1 \dot{I}_1; \quad Z_1^M = \frac{Z_{ст}^M R_a^M}{Z_{ст}^M + R_a^M}, \quad (5)$$

где

$$\xi_{ст1} = \frac{2R_a^M + (1-a/3D_a)Z_{ст}^M}{2(R_a^M + Z_{ст}^M)}. \quad (6)$$

Этап 3. Получение выражений для магнитных потоков в обмотке НН ($\dot{\Phi}_a$) и в стержне ($\dot{\Phi}_{ст}$). Чтобы выразить потоки $\dot{\Phi}_a, \dot{\Phi}_{ст}$ через поток $\dot{\Phi}_{я}^a$, следует воспользоваться двумя вы-



ражениями для магнитного напряжения $\dot{U}_{qp_a}^M$ между точками q и p_a по схеме рис. 2, а и по схеме рис. 2, б:

$$\dot{U}_{qp_a}^M = R_a^M \dot{\Phi}_a - \dot{F}_a = Z_1^M \dot{\Phi}_a^a - \dot{F}_{13}, \quad (7)$$

откуда следует

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_a &= \frac{1}{R_a^M} (Z_1^M \dot{\Phi}_a^a - \dot{F}_{13} + \dot{F}_a) = \\ &= \frac{Z_{ct}^M}{R_a^M + Z_{ct}^M} \dot{\Phi}_a^a - \frac{1+a/3D_a}{2(R_a^M + Z_{ct}^M)} w_1 \dot{I}_1; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_{ct} &= \dot{\Phi}_a^a - \dot{\Phi}_a = \\ &= \frac{R_a^M}{R_a^M + Z_{ct}^M} \dot{\Phi}_a^a + \frac{1+a/3D_a}{2(R_a^M + Z_{ct}^M)} w_1 \dot{I}_1. \end{aligned} \quad (9)$$

Этап 4. Переход к магнитоэлектрической схеме замещения с 2×2 -полюсниками. После подстановки величины $\dot{\Phi}_a$ в (2) ЭДС \dot{E}_1 можно представить в виде

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_{13} + Z_{aa} \dot{I}_1, \quad (10)$$

где обозначено

$$Z_{aa} = j w_1^2 \frac{(4+2a/D_a) R_a^M + (1-a^2/3D_a^2) Z_{ct}^M}{12 R_a^M (R_a^M + Z_{ct}^M)}, \quad (11)$$

$$\dot{E}_{13} = j \omega w_1 \dot{\xi}_{ct1} \dot{\Phi}_a^a. \quad (12)$$

Замечательно, что пара управляемых источников электрического и магнитного напряжений $\dot{E}_{13} = \dot{U}_{13}$ и $\dot{F}_{13} = \dot{U}_{13}^M$ образуют 2×2 -полюсник с матрицей \mathbf{A}_1 , являющийся инвертором, как представлено на рис. 2, в.

Выражения (1)–(12) по форме полностью совпадают с соответствующими соотношениями из [3], но отличаются значением величины Z_{ct}^M , в которой учитывается лишь часть комплексного магнитного сопротивления стыковых ярм от стержня до точек p_a и q_a (рис. 1, а).

Этап 5. Замена параллельных (R_b^M, \dot{F}_b)-ветви и ($Z_6^M, w_2 \dot{I}_2$)-ветви одной эквивалентной (Z_2^M, \dot{F}_{23})-ветвью (рис. 2, б). Параметры эквивалентной ветви получаются такими:

$$\dot{F}_{23} = \dot{\xi}_{cm2} w_2 \dot{I}_2; \quad Z_2^M = \frac{Z_6^M R_b^M}{Z_6^M + R_b^M}, \quad (13)$$

где

$$\dot{\xi}_{ct2} = \frac{2 R_b^M + (1+b/3D_b) Z_6^M}{2(R_b^M + Z_6^M)}. \quad (14)$$

Выражения для магнитного потока $\dot{\Phi}_b$ через обмотку ВН и потока $\dot{\Phi}_6$ в боковом ярме имеют вид

$$\dot{\Phi}_b = \frac{Z_6^M}{R_b^M + Z_6^M} \dot{\Phi}_a^a - \frac{1-b/3D_b}{2(R_b^M + Z_6^M)} w_2 \dot{I}_2; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_6 &= \dot{\Phi}_a^a - \dot{\Phi}_b = \\ &= \frac{R_b^M}{R_b^M + Z_6^M} \dot{\Phi}_a^a + \frac{1-b/3D_b}{2(R_b^M + Z_6^M)} w_2 \dot{I}_2. \end{aligned} \quad (16)$$

После подстановки $\dot{\Phi}_b$ в выражение (4) получаем

$$\dot{E}_2 = \dot{E}_{23} + Z_{bb} \dot{I}_2, \quad (17)$$

где обозначено

$$\begin{aligned} Z_{bb} &= j \omega w_2^2 \times \\ &\times \frac{(4-2b/D_b) R_b^M + (1-b^2/3D_b^2) Z_6^M}{12 R_b^M (R_b^M + Z_6^M)}; \end{aligned} \quad (18)$$

$$\dot{E}_{23} = j \omega w_2 \dot{\xi}_{ct2} \dot{\Phi}_a^a, \quad (19)$$

что позволяет также заменить пару управляемых источников $\dot{E}_{23} = \dot{U}_{23}$ и $\dot{F}_{23} = \dot{U}_{23}^M$ 2×2 -полюсником с матрицей \mathbf{A}_2 (рис. 2, в).

Выражения (13)–(19) по форме совпадают с соответствующими выражениями [3], но отличаются значением величины Z_6^M , в которой учитывается лишь часть комплексного магнитного сопротивления стыковых ярм от бокового ярма до точек p_b и q_b (рис. 1, а).

Этап 6. Определение выражения для магнитного потока в межобмоточном пространстве. Непосредственно по схеме рис. 2, б согласно второму закону Кирхгофа имеем

$$R_8^M \dot{\Phi}_8 + (Z_1^M + Z_a^M) \dot{\Phi}_a^a = \dot{F}_{13},$$

откуда

$$\begin{aligned}\dot{\Phi}_\delta &= \frac{1}{R_\delta^M} [-(Z_1^M + Z_{я}^{Ma})\dot{\Phi}_я^a + \dot{F}_{1\varphi}] = \\ &= \frac{1}{R_\delta^M} [-(Z_1^M + Z_{я}^{Ma})\dot{\Phi}_я^a + \dot{\xi}_{ст1} w_1 \dot{I}_1].\end{aligned}\quad (20)$$

Поток ярма $\dot{\Phi}_я^b$ к обмотке ВН можно найти по формуле

$$\dot{\Phi}_я^b = \dot{\Phi}_я^a - \dot{\Phi}_\delta. \quad (21)$$

Этап 7. Перенос магнитных сопротивлений в электрическую подсхему. Эта процедура подробно описана в [3, 6]. Для этих целей наиболее удобна для преобразования схема с 2×2 -полюсниками (рис. 2, в), где

$$\begin{aligned}A_1 &= \begin{bmatrix} & B_1 \\ C_1 & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & j\omega w_1 \\ 1/w_1 & \end{bmatrix}; \\ A_2 &= \begin{bmatrix} & B_2 \\ C_2 & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & -w_2 \\ -1/j\omega w_2 & \end{bmatrix}.\end{aligned}$$

В [3] электрическая схема была получена в виде (рис. 3, а), где ветвь Z_{11} образовывалась в результате переноса единственного слева от узла p магнитного сопротивления Z_1^M через 2×2 -полюсник с матрицей A_1 .

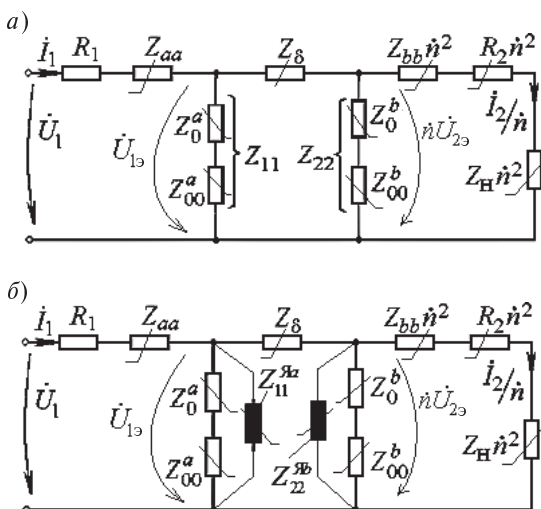


Рис. 3. 2Т-образная схема замещения (а) и 2ТУ-образная схема замещения (б) для установившегося режима трансформатора

В нашем случае после переноса Z_1^M необходимо перенести и магнитное сопротивление $Z_{я}^{Ma}$. Это приведет к тому, что к левой поперечной ветви $Z_{11} = Z_0^a + Z_{00}^a$ добавится параллельная ей ветвь с электрическим сопротивлением

$$Z_{11}^{яa} = \frac{B_1 / C_1}{Z_{я}^{Ma}} = \frac{j\omega w_1^2}{Z_{я}^{Ma}} \xi_{ст1}^2, \quad (22)$$

изображенная на рис. 3, б зачерненным прямоугольником. Аналогичным образом через 2×2 -полюсник A_1 переносятся магнитные сопротивления $Z_{я}^{Mb}$ и Z_2^M . В результате к правой поперечной ветви с сопротивлением $Z_{22} = Z_0^b + Z_{00}^b$ (рис. 3, а) добавляется параллельная ей ветвь с сопротивлением

$$Z_{22}^{яb} = \frac{B_1 / C_1}{Z_{я}^{Mb}} = \frac{j\omega w_1^2}{Z_{я}^{Mb}} \xi_{ст1}^2, \quad (23)$$

показанная на схеме рис. 3, б в виде зачерненного прямоугольника.

Образовавшееся после переноса всех магнитных элементов каскадное соединение инверторов с матрицами A_1 и A_2 заменяем эквивалентным 2×2 -полюсником с матрицей

$$A = A_1 A_2 = \begin{bmatrix} -\frac{w_1 \dot{\xi}_{ст1}}{w_2 \dot{\xi}_{ст2}} & \\ & -\frac{w_2 \dot{\xi}_{ст2}}{w_1 \dot{\xi}_{ст1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{n} & \\ & 1/\dot{n} \end{bmatrix}.$$

Вид матрицы A показывает, что 2×2 -полюсник является идеальным трансформатором с комплексным коэффициентом трансформации

$$\dot{n} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = -\frac{w_1 \dot{\xi}_{ст1}}{w_2 \dot{\xi}_{ст2}}.$$

Используя свойства идеального трансформатора как преобразователя сопротивлений, можно заменить его вместе с сопротивлениями Z_{bb} , R_2 , Z_H приведенными сопротивлениями $\dot{n}^2 Z_{bb}$, $\dot{n}^2 R_2$, $\dot{n}^2 Z_H$ и представить схему в виде рис. 3, б.

Схема на рис. 3, б представляет собой электрическую 2ТУ-схему замещения трансформатора с параметрами, приведенными к внутренней обмотке. Помимо двух дополнительных попереч-



ных сопротивлений $Z_{11}^{яa}$ и $Z_{22}^{яb}$, она отличается от 2Т-схемы (рис. 3, а) еще и тем, что во входящих в формулы для вычисления параметров магнитные сопротивления $Z_{ст}^M$ и Z_6^M учитывают лишь части стыковых ярм: соответственно до точек p_a и q_a слева и до точек p_b и q_b справа (рис. 1, а).

Расчет нелинейной 2ТУ-образной схемы замещения. Схема (рис. 3, б) позволяет найти установившийся режим работы трансформатора. Расчет производится итерационным методом. На каждой итерации нелинейные элементы заменяются линейными и схема свертывается к двухполюснику с эквивалентным сопротивлением

$$Z = R_1 + Z_{aa} + \frac{1}{Y_{11}^\Sigma + \frac{1}{Z_\delta + \frac{1}{Y_{22}^\Sigma + \frac{1}{Z'_{bb} + R'_2 + Z'_H}}}},$$

где

$$Y_{11}^\Sigma = \frac{1}{Z_0^a + Z_{00}^a} + \frac{1}{Z_{11}^{яa}}; \quad Y_{22}^\Sigma = \frac{1}{Z_0^b + Z_{00}^b} + \frac{1}{Z_{22}^{яb}};$$

$$Z'_{bb} = \dot{n}^2 Z_{bb}; \quad R'_2 = \dot{n}^2 R_2;$$

$$Z'_H = \dot{n}^2 Z_H,$$

после чего определяются все токи.

Особенность заключается в том, что при обновлении параметров нелинейных элементов 2ТУ-схемы для следующей итерации необходимо знать обновленные параметры нелинейных магнитных сопротивлений $R_{ст}^M$, $R_{яa}^M$, $R_{яb}^M$ и R_6^M , которые зависят от значений магнитных потоков $\dot{\Phi}_{ст}$, $\dot{\Phi}_я^a$, $\dot{\Phi}_я^b$ и $\dot{\Phi}_6$ на предыдущей итерации. Формулы для расчета этих потоков представлены в табл. 1, где приведены также формулы для потоков в окне трансформатора $\dot{\Phi}_a$, $\dot{\Phi}_\delta$ и $\dot{\Phi}_b$.

В данной работе обновление магнитного сопротивления k -го участка магнитопровода осуществляется на основе следующего итерационного соотношения:

$$R_k^M = \frac{U_k^M}{\Phi_k} = \frac{U_k^M}{(A_k U_k^M)^{1/n}} =$$

Таблица 1

Расчет магнитных потоков

Поток и номер формулы	Формула
В стыковом a -ярме (13)	$\dot{\Phi}_я^a = \frac{\dot{E}_{1э}}{j\omega w_1 \dot{\xi}_{ст1}} = \frac{\dot{U}_1 - (R_1 + Z_{aa})\dot{I}_1}{j\omega w_1 \dot{\xi}_{ст1}}$
В стыковом b -ярме (20)	$\dot{\Phi}_я^b = \frac{\dot{E}_{2э}}{j\omega w_2 \dot{\xi}_{ст2}} = \frac{(R_2 + Z_H + Z_{bb})\dot{I}_2}{j\omega w_2 \dot{\xi}_{ст2}}$
Через внутреннюю обмотку (8)	$\dot{\Phi}_a = \frac{Z_{ст}^M}{R_a^M + Z_{ст}^M} \dot{\Phi}_я^a - \frac{1+a/(3D_a)}{2(R_a^M + Z_{ст}^M)} w_1 \dot{I}_1$
Через внешнюю обмотку (16)	$\dot{\Phi}_b = \frac{Z_6^M}{R_b^M + Z_6^M} \dot{\Phi}_я^b - \frac{1-b/(3D_b)}{2(R_b^M + Z_6^M)} w_2 \dot{I}_2$
В стержне (9)	$\dot{\Phi}_{ст} = \dot{\Phi}_я^a - \dot{\Phi}_a$
В боковом ярме (17)	$\dot{\Phi}_6 = \dot{\Phi}_я^b - \dot{\Phi}_b$
В промежутке между обмотками (22)	$\dot{\Phi}_\delta = \dot{\Phi}_я^a - \dot{\Phi}_я^b$
В окне	$\dot{\Phi}_{окно} = \dot{\Phi}_{ст} - \dot{\Phi}_6$

$$= \frac{(R_k^M)^{OLD} \Phi_k^{OLD}}{\left[A_k (R_k^M)^{OLD} \Phi_k^{OLD} \right]^{1/n}},$$

где OLD — индекс предшествующей итерации. Таким образом, в действительности расчет ведется по магнитоэлектрической схеме. Представленный алгоритм реализован на кафедре ТОЭ в среде MATLAB в виде следующих программ:

magn_sost_2nn.m — повышающий тр-р (2Т-схема замещения (рис. 3, а));

ymagn_sost_2nn.m — повышающий тр-р (2ТУ-схема замещения (рис. 3, б));

magn_sost_27nn.m — понижающий тр-р (2Т-схема замещения (рис. 3, а));

ymagn_sost_27nn.m — понижающий тр-р (2ТУ-схема замещения (рис. 3, б)).

Примечание. Расчеты можно вести, взяв за основу любую из магнитоэлектрических схем на рис. 2, при этом токи I_1 и I_2 определяются не в результате сворачивания 2ТУ-схемы, а с помощью системы нелинейных уравнений, составленных для соответствующей МЭСЗ.

Пример. На рис. 4–6 представлены графики, полученные с помощью программы *ymagn_sost_2nn.m* для силового однофазного повышающего броневого трансформатора со следующими каталожными данными: $S_{ном} = 10/3 = 3,333$ мВА; $U_{нн} = 11/\sqrt{3} = 66,4$ кВ; $U_{вн} = 115/\sqrt{3} = 66,4$ кВ; $P_{xx} = 14/3 = 4,67$ кВт; $I_0 = 0,9$ %; $P_{кз} = 60/3 = 20$ кВт; $u_{кз} = 10,5$ %. Конструктивные параметры обмоток (мм): $d_{ст} = 436,8$; $h_{обм} = h_{ст} = 873,6$; $\delta_1 = a_{01} = 30$; $a = a_1 = 41,9$; $\delta = a_{12} = 50$; $b = a_2 = 62,9$; $\delta_2 = a_{22} = 50$; $D_\delta = D_{12} = 630,7$; а также числа витков обмоток $w_1 = 125$, $w_2 = 1302$ (здесь использованы общепринятые в учебниках обозначения [1]). Сечение стержня с учетом его заполнения сталью $s_{Fe} = 0,135$ м². Максимальное значение индукции в магнитопроводе при ХХ $B_m = \sqrt{2}U_{нн} / (\omega w_1 s_{Fe}) = 1,7$ Тл. Для этого трансформатора на рис. 4 представлены зависимости изменения аргументов магнитных потоков относительно аргумента потока холостого хода $\Phi_0 = \Phi_0$.

Из них следует, что поток Φ_6 в режиме КЗ практически «опрокидывается», т. е. изменяет

свое направление относительно потока ХХ почти на 180° и становится противоположным потоку $\Phi_{ст}$ в этом режиме. На рис. 4 не приведен график $\arg(\Phi_{ст})$, поскольку независимо от угла нагрузки φ_2 эта величина близка к нулю.

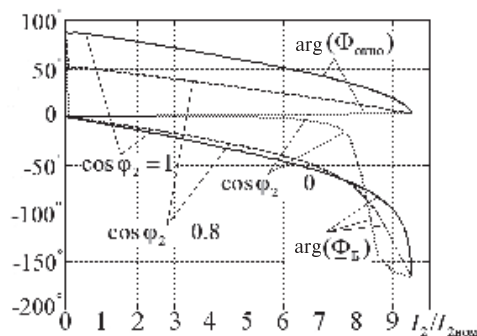


Рис. 4. Аргументы магнитных потоков в боковом ярме и окне трансформатора для активно-индуктивной нагрузки при значениях $\cos \varphi_2$, равных 1, 0,8 и 0; изменения амплитуд соответствующих потоков представлены в [5, рис. 2, а, б, в] (программа *ymagn_sost_2nn.m*)

Неравномерность намагничивания магнитопровода трансформатора. Используемая в классической теории гипотеза о результирующем потоке в магнитопроводе трансформатора означает, что магнитопровод в любом режиме намагничивается однородно. Этот ошибочный смысл заложен и в Т-образной схеме замещения. В действительности, как показывают расчеты по 2ТУ-схеме замещения, данное условие приближенно выполняется лишь в режимах от ХХ до номинального. Это следует, в частности, из рассмотрения кривых изменения магнитных проницаемостей участков магнитопровода для рассматриваемого примера трансформатора (рис. 5, а) в диапазоне $0 < (I_2 / I_{2ном}) < 1$, где $\mu_{ст}$ и μ_6 — магнитные проницаемости стержня и бокового ярма, а $\mu_{яа}$ и $\mu_{яб}$ — стыкового ярма соответственно над обмоткой НН и над обмоткой ВН.

Однако далее значения магнитных проницаемостей в стержне, боковом ярме и в стыковом ярме над обмоткой НН существенно различаются. Это различие еще более существенно при повышенном напряжении, например при $U_1 = \sqrt{3}U_{ном}$ (рис. 5, б), что имеет место при случайном подключении трансформатора к линей-

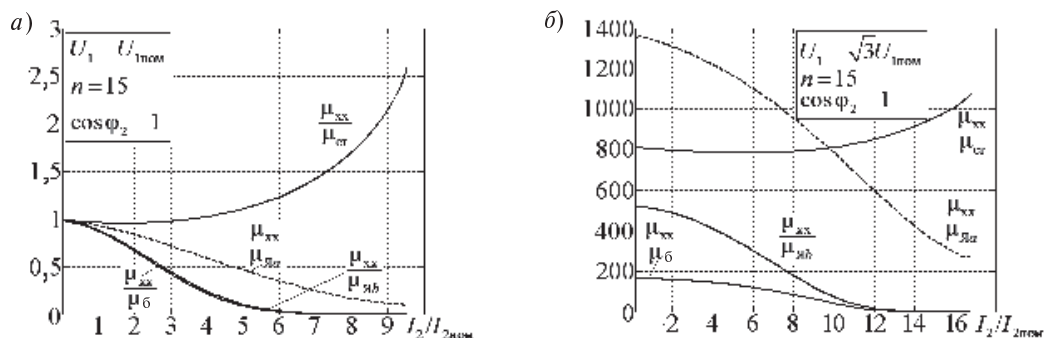


Рис. 5. Полученные по 2ТУ-образной схеме замещения (программа *ymagn_sost_2nn.m*) зависимости насыщения стали участков магнитопровода повышающего трансформатора от изменения чисто активной нагрузки при $U_1 = U_{1\text{ном}}$ (а) и при $U_1 = \sqrt{3}U_{1\text{ном}}$ (б)

ному напряжению вместо фазового [7]. Одновременно зависимости на рис. 5 иллюстрирует важность учета в МЭСЗ комплексных магнитных сопротивлений участков стыковых ярм и необходимость использования для расчетов трансформаторов 2ТУ-образной схемы замещения (рис. 3, б) вместо 2Т-образной схемы замещения (рис. 3, а).

Влияние учета нелинейных магнитных сопротивлений стыковых ярм на распределение магнитных потоков в трансформаторе иллюстрируется на рис. 6.

Здесь также видно, что гипотеза о результирующем потоке в магнитопроводе работает только при $U_1 \leq U_{1\text{ном}}$ и лишь в диапазоне изменения нагрузки $0 < I_2 / I_{2\text{ном}} < 1$, после чего магнитные потоки в стержне, боковом ярме и стыковых ярмах становятся существенно разными (рис. 6, а). При напряжении $U_1 > U_{1\text{ном}}$ различие потоков имеет место даже при ХХ (рис. 6, б), причем по-

токи в стыковых ярмах $\Phi_{\text{я}}^a$ и $\Phi_{\text{я}}^b$ могут превышать потоки соответственно в стержне ($\Phi_{\text{ст}}$) и боковом ярме (Φ_6). Это также подтверждается зависимостями магнитных потоков для активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузок, приведенными в [5].

Сравнение 2ТУ-образной и 2Т-образной схем замещения. Отвечая на главный вопрос, почему важно в МЭСЗ учитывать магнитные сопротивления стыковых ярм (рис. 1, а, б), необходимо также сравнить расчеты магнитных нагрузок по 2ТУ-образной схеме замещения (рис. 3, б) с аналогичными расчетами по 2Т-образной схеме замещения (рис. 3, а). Как и следовало ожидать, обе схемы замещения дают практически одинаковые результаты при $U_1 = U_{1\text{ном}}$. Различие проявляется при повышенном напряжении, например при $U_1 = \sqrt{3}U_{1\text{ном}}$, что ясно видно из сравнения кривых (рис. 5, б), характеризующих

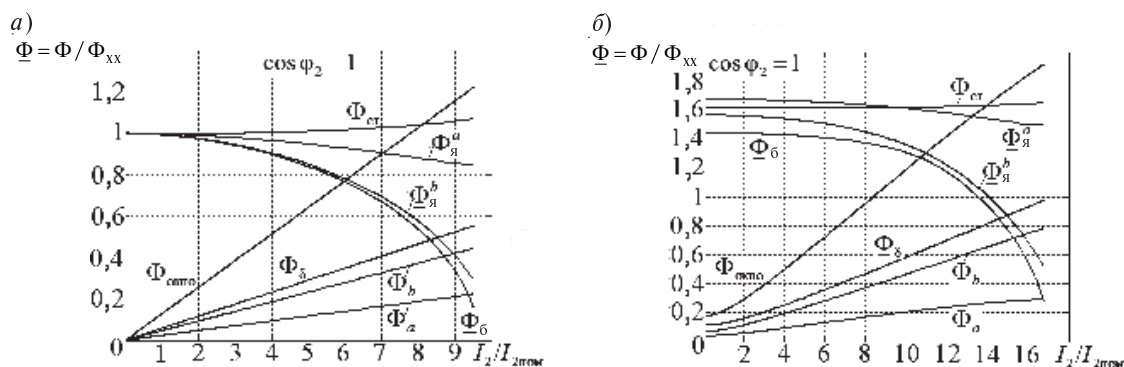


Рис. 6. Полученные по 2ТУ-образной схеме замещения (программа *ymagn_sost_2nn.m*) зависимости магнитных потоков отдельных участков трансформатора от изменения чисто активной нагрузки при $U_1 = U_{1\text{ном}}$ (а) и при $U_1 = \sqrt{3}U_{1\text{ном}}$ (б)

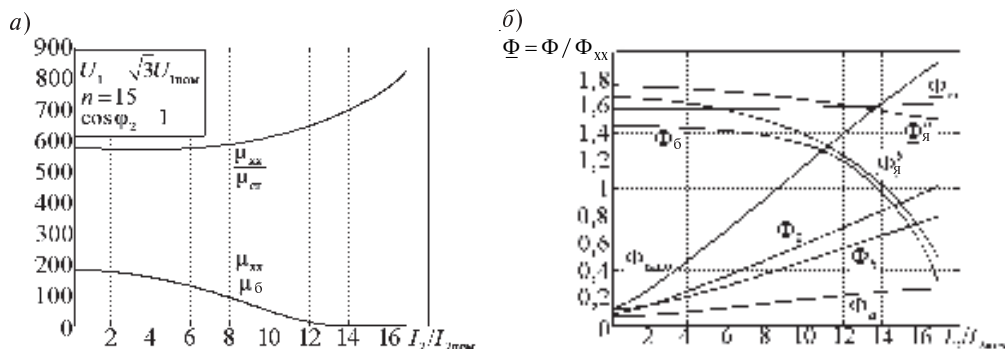


Рис. 7. Полученные по 2Т-образной схеме замещения трансформатора (программа *ymagn_sost_2nn.m*) зависимости насыщения стали стержня и бокового ярма повышающего трансформатора (а) и магнитных потоков (б) от изменения чисто активной нагрузки при $U_1 = \sqrt{3}U_{\text{ном}}$

степень насыщения стали, которые получены по 2ТУ-образной схеме замещения, с кривыми рис. 7, а, полученными по 2Т-образной схеме замещения.

На рис. 7, а отсутствует кривые $\mu_{xx}/\mu_{яа}$ и $\mu_{xx}/\mu_{яб}$ для стыковых ярем, поскольку 2Т-образная схема замещения не содержит соответствующих им участков. Имеет место существенное различие и в величинах магнитных потоков, что обнаруживается из сравнения кривых на рис. 6, б, полученных по 2ТУ-образной схеме замещения, и кривых на рис. 7, б, полученных по 2Т-образной схеме замещения.

Из сказанного понятно, сколь важна 2ТУ-образная схема замещения как основа последующего получения динамической модели трансформатора для исследования переходных процессов. Одна из таких моделей для слабонасыщенного трансформатора, в котором в любой момент времени значения магнитных проницаемостей участков магнитопровода $\mu > 10\mu_0$, представлена на рис. 8.

Основные этапы перехода от 2ТУ-образной схемы замещения (рис. 3, б) к схеме с явным

представлением индуктивностей (рис. 8) аналогичны приведенным в [3]. Однако, в отличие от модели в [3], динамическая 2ТУ-образная схема замещения для слабонасыщенного трансформатора содержит дополнительные поперечные ветви нелинейных индуктивностей $b_{0я}^a$ и $b_{0я}^b$, учитывающих состояние участков ярма соответственно $p_a p$ и $p p_b$. По методике, изложенной в [3], можно получить и так называемые полусверхнасыщенные и сверхнасыщенные динамические модели трансформатора с учетом насыщения стыковых ярем.

Коэффициенты магнитного состояния (КМС) в режиме КЗ трансформатора. Под КМС участка подразумевается значение магнитного потока участка трансформатора, отнесенное к его потоку холостого хода $\dot{\Phi}_0$ в магнитопроводе: $\dot{k}_i = \dot{\Phi}_i / \dot{\Phi}_0$.

В табл. 2 представлены выражения модулей КМС для различных участков повышающего трансформатора в режиме опыта КЗ, при котором магнитная система трансформатора ненасыщена и можно принять магнитную проницаемость стали равной бесконечности.

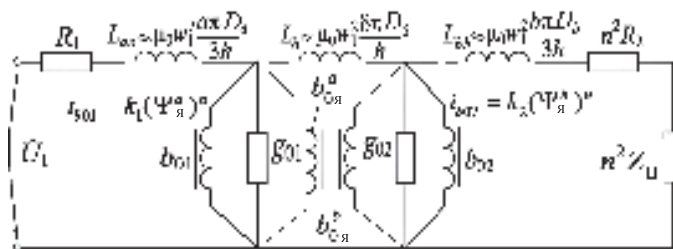


Рис. 8. Динамическая 2ТУ-образная схема замещения слабонасыщенного трансформатора ($\mu_{Fe} > 10\mu_0$)

Таблица 2

**Коэффициенты магнитного состояния
в режимах короткого замыкания повышающего трансформатора**

Коэффициент магнитного состояния	Упрощенные выражения при $D_\delta \rightarrow \infty$
$k_{\text{ст}}^{\text{КЗвнеш}} = \frac{\Phi_{\text{ст}}^{\text{КЗвнеш}}}{\Phi_0} = 1 + \frac{a(D_\delta - \delta - a)}{6 \left[D_\delta \left(\delta + \frac{a+b}{3} \right) + \frac{b-a}{3} \left(\delta + \frac{(b+a)}{2} \right) \right]}$	$k_{\text{ст}}^{\text{КЗвнеш}} = 1 + \frac{a}{2a + 6\delta + 2b}$
$k_b^{\text{КЗвнеш}} = \frac{\Phi_b^{\text{КЗвнеш}}}{\Phi_0} = - \frac{b(D_\delta + \delta + b)}{6 \left[D_\delta \left(\delta + \frac{a+b}{3} \right) + \frac{b-a}{3} \left(\delta + \frac{(b+a)}{2} \right) \right]}$	$k_b^{\text{КЗвнеш}} = - \frac{b}{2a + 6\delta + 2b}$
$k_{\text{ая}}^{\text{КЗвнеш}} = \frac{\Phi_{\text{ая}}^{\text{КЗвнеш}}}{\Phi_0} = 1 - \frac{\frac{aD_\delta}{3} - \frac{a(2\delta + a)}{6}}{D_\delta \left(\delta + \frac{a+b}{3} \right) + \frac{1}{3}(b-a) \left(\delta + \frac{a+b}{2} \right)}$	$k_{\text{ая}}^{\text{КЗвнеш}} = \frac{3\delta + b}{a + 3\delta + b}$
$k_{\text{бя}}^{\text{КЗвнеш}} = \frac{\Phi_{\text{бя}}^{\text{КЗвнеш}}}{\Phi_0} = 1 - \frac{\frac{D_\delta(a + 3\delta)}{3} - \frac{a(a + 2\delta)}{6}}{D_\delta \left(\delta + \frac{a+b}{3} \right) + \frac{1}{3}(b-a) \left(\delta + \frac{a+b}{2} \right)}$	$k_{\text{бя}}^{\text{КЗвнеш}} = \frac{b}{a + 3\delta + b}$
$k_a^{\text{КЗвнеш}} = \frac{\Phi_a^{\text{КЗвнеш}}}{\Phi_0} = - \frac{aD_\delta - a\delta - 2a^2/3}{2 \left[D_\delta \left(\delta + \frac{a+b}{3} \right) + \frac{1}{3}(b-a) \left(\delta + \frac{a+b}{2} \right) \right]}$	$k_a^{\text{КЗвнеш}} = - \frac{3a}{2a + 6\delta + 2b}$
$k_b^{\text{КЗвнеш}} = \frac{\Phi_b^{\text{КЗвнеш}}}{\Phi_0} = - \frac{bD_\delta + b\delta + 2b^2/3}{2 \left[D_\delta \left(\delta + \frac{a+b}{3} \right) + \frac{1}{3}(b-a) \left(\delta + \frac{a+b}{2} \right) \right]}$	$k_b^{\text{КЗвнеш}} = \frac{3b}{2a + 6\delta + 2b}$
$k_\delta^{\text{КЗвнеш}} = \frac{\Phi_\delta^{\text{КЗвнеш}}}{\Phi_0} = \frac{\delta D_\delta}{D_\delta \left(\delta + \frac{a+b}{3} \right) + \frac{1}{3}(b-a) \left(\delta + \frac{a+b}{2} \right)}$	$k_\delta^{\text{КЗвнеш}} = \frac{3\delta}{a + 3\delta + b}$

Таблица 3

**Коэффициенты магнитного состояния
в режимах короткого замыкания понижающего трансформатора**

Коэффициенты магнитного состояния	Упрощенные выражения при $D_\delta \rightarrow \infty$
$k_{\text{ст}}^{\text{КЗвнут}} = \frac{\Phi_{\text{ст}}^{\text{КЗвнут}}}{\Phi_0} = - \frac{a(D_\delta - \delta - a)}{6 \left[D_\delta \left(\delta + \frac{a+b}{3} \right) + \frac{b-a}{3} \left(\delta + \frac{(b+a)}{2} \right) \right]}$	$k_{\text{ст}}^{\text{КЗвнут}} = - \frac{a}{2a + 6\delta + 2b}$
$k_b^{\text{КЗвнут}} = \frac{\Phi_b^{\text{КЗвнут}}}{\Phi_0} = 1 + \frac{b(D_\delta + \delta + b)}{6 \left[D_\delta \left(\delta + \frac{a+b}{3} \right) + \frac{b-a}{3} \left(\delta + \frac{(b+a)}{2} \right) \right]}$	$k_b^{\text{КЗвнут}} = 1 + \frac{b}{2a + 6\delta + 2b}$

Окончание табл. 3

Коэффициенты магнитного состояния	Упрощенные выражения при $D_{\delta} \rightarrow \infty$
$k_{a\gamma}^{KЗвнут} = \frac{\Phi_{a\gamma}^{KЗвнут}}{\Phi_0} = 1 - \frac{\frac{D_{\delta}(b+3\delta)}{3} + \frac{b(3b+2\delta)}{6}}{D_{\delta}\left(\delta + \frac{a+b}{3}\right) + \frac{1}{3}(b-a)\left(\delta + \frac{a+b}{2}\right)}$	$k_{a\gamma}^{KЗвнут} = \frac{a}{a+3\delta+b}$
$k_{b\gamma}^{KЗвнут} = \frac{\Phi_{b\gamma}^{KЗвнут}}{\Phi_0} = 1 - \frac{\frac{bD_{\delta}}{3} + \frac{b(2\delta+3b)}{6}}{D_{\delta}\left(\delta + \frac{a+b}{3}\right) + \frac{1}{3}(b-a)\left(\delta + \frac{a+b}{2}\right)}$	$k_{b\gamma}^{KЗвнут} = \frac{a+3\delta}{a+3\delta+b}$
$k_a^{KЗвнут} = \frac{\Phi_a^{KЗвнут}}{\Phi_0} = \frac{aD_{\delta} - a\delta - 4a^2/3}{2\left[D_{\delta}\left(\delta + \frac{a+b}{3}\right) + \frac{1}{3}(b-a)\left(\delta + \frac{a+b}{2}\right)\right]}$	$k_a^{KЗвнут} = \frac{3a}{2a+6\delta+2b}$
$k_b^{KЗвнут} = \frac{\Phi_b^{KЗвнут}}{\Phi_0} = -\frac{bD_{\delta} + b\delta + 4b^2/3}{2\left[D_{\delta}\left(\delta + \frac{a+b}{3}\right) + \frac{1}{3}(b-a)\left(\delta + \frac{a+b}{2}\right)\right]}$	$k_b^{KЗвнут} = -\frac{3b}{2a+6\delta+2b}$
$k_{\delta}^{KЗвнут} = \frac{\Phi_{\delta}^{KЗвнут}}{\Phi_0} = \frac{\delta D_{\delta}}{D_{\delta}\left(\delta + \frac{a+b}{3}\right) + \frac{1}{3}(b-a)\left(\delta + \frac{a+b}{2}\right)}$	$k_{\delta}^{KЗвнут} = \frac{3\delta}{a+3\delta+b}$

Вывод этих формул базируется на 2Т-схеме замещения, которая в этом случае совпадает с 2ТУ-образной схемой замещения. В табл. 3 представлены выражения КМС для понижающего трансформатора.

В отличие от [3, 8] в табл. 2 и 3 представлен полный набор КМС, включая КМС стыковых ярм. Между КМС имеют место следующие связи:

$$\dot{k}_{ст} = \dot{k}_{я}^a - \dot{k}_a; \quad \dot{k}_{\delta} = \dot{k}_{я}^b - \dot{k}_b; \quad \dot{k} = \dot{k}_{я}^a - \dot{k}_{я}^b,$$

что подтверждается формулами табл. 2 и 3.

Из изложенного следует такие выводы:

1. Как и 2Т-образные схемы [3], 2ТУ-образные схемы замещения совместимы со сверх- и антипотоками при КЗ трансформатора, но являются более точными, поскольку в них учитывается степень насыщения участков стыковых ярм.

2. Следует иметь в виду, что наиболее точными моделями трансформаторов остаются МЭСЗ, в которых используется понятие магнитный ток [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольдек, А.И. Электрические машины [Текст] / А.И. Вольдек.— Л.: Энергия, 1974.
2. Теоретические основы электротехники. Т. 2 [Текст] / Под ред. П.А. Ионкина.— М.: Высш. школа, 1976.
3. Шакиров, М.А. 2Т-образные схемы замещения трансформаторов [Текст] / М.А. Шакиров // Электричество.— 2010, № 5.— С. 19–36.
4. Шакиров, М.А. Аномальные магнитные потоки в двухобмоточном трансформаторе при коротком замыкании [Текст] / М.А. Шакиров, В.В. Андрушук, Лион Дуань // Электричество.— 2010, № 3.— С. 55–63.
5. Шакиров, М.А. Достоверность 2Т-образной схемы замещения силового трансформатора [Текст] / М.А. Шакиров, В.В. Андрушук, Сынань Ван // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— Сер.: Наука и образование.— 2010. № 4.— С. 72–79.
6. Шакиров, М.А. Перенос элементов электрической цепи через 2–2х2-полюсники [Текст] / М.А. Шакиров // Электричество.— 2007. № 11.— С. 45–53.
7. Нетушил, А.В. Об условности линеаризации модели трансформатора [Текст] / А.В. Нетушил // Электричество.— 1998. № 5.



8. Александров, Г.Н. Трансформаторы и реакторы. Новые идеи и принципы [Текст] / Г.Н. Александров, М.А. Шакиров. — СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2006.

9. Шакиров, М.А. Анализ неравномерности распределения магнитных нагрузок и потерь в трансформаторах на основе магнитоэлектрических схем замещения [Текст] / М.А. Шакиров // Электричество.— 2005. № 11.— С. 15–27.

УДК 62-665.3

В.В. Сергеев, А.С. Алешина

ПРЕДПОСЫЛКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА

Рост городов и увеличение городского населения, развитие промышленности и технический прогресс приводят к ухудшению экологических условий проживания людей, особенно в крупных городах, где хозяйственная деятельность наиболее сконцентрирована и где на ограниченной территории сосредоточена значительная часть населения. В городах происходит наиболее интенсивное накопление твердых бытовых отходов (ТБО) и крупногабаритного мусора, которые при неправильном и несвоевременном удалении и обезвреживании могут серьезно загрязнять окружающую природную среду. Неутилизированные должным образом органосодержащие отходы, размещенные на полигонах хранения (свалках) и полях компостирования, подвергаются гниению, анаэробному разложению, являются источником выделения вредных веществ в атмосферу. Кроме того, повсеместно возникающие вокруг городов плохо организованные, а порой и просто «стихийные» свалки — это наиболее серьезные загрязнители поверхностных и грунтовых вод.

К ТБО относятся отходы, образующиеся в жилых и общественных зданиях (в том числе от текущего ремонта квартир), торговых, зрелищных, спортивных и других учреждениях, отходы от устройств местного отопления. Кроме того, к муниципальным относятся крупногабаритные отходы, дорожный и дворовый мусор [1]. Такое определение соответствует зарубежному термину «твердые муниципальные отходы» (Municipal Solid Waste). ТБО классифицируют по источникам образования, по морфологическому составу, по степени опасности, по направлениям переработки и т. д.

В городах России, где проживает более 108 млн человек, ежегодно образуется около

130 млн м³ ТБО. В среднем в стране каждый человек ежегодно выбрасывает 1 м³ или 200–250 кг отходов, что эквивалентно 50–60 кг угля средней теплотворной способности. Для размещения такого количества ТБО ежегодно отчуждается 10 тыс. га пригодных для использования земель [2].

Сооружение специально обустроенных свалок-полигонов, отвечающих всем современным требованиям, включая дорогостоящие мониторинг и эксплуатацию, требует больших капиталовложений и значительных последующих эксплуатационных расходов. Все это, а также необходимость отчуждения на многие годы громадных площадей под такие полигоны обусловило мировую тенденцию в отношении проблемы ТБО — строительство и расширение заводов по переработке отходов с одновременным сокращением количества дорогостоящих полигонов. В настоящее время в России утилизируется только 1,5 % ТБО, в то время как в Европе — от 60 (в Германии) до 80 % (в Швейцарии и Дании), в Японии — 85 %. Древесные отходы используются на 30 %, в государствах Европы — на 60–70 % [2].

В России, где добыча энергоресурсов сосредоточена на значительных расстояниях от их основных потребителей, возрастает роль местных видов топлива, значительная часть которых может быть получена при переработке горючей части ТБО и использоваться для производства тепловой и электрической энергии. Решение вопроса переработки бытовых отходов кроме существенной экономии энергетических ресурсов приводит к снижению экологической нагрузки на окружающую среду от жизнедеятельности человека.

Таким образом, проблема переработки твердых бытовых отходов — одна из приоритетных в мире. Отставание России в этом вопросе недопустимо. Направления переработки ТБО определяются их составом, наличием соответствующих технологий, оборудования, потребителей продуктов переработки.

Состав твердых бытовых отходов

Смеси ТБО по морфологическому признаку подразделяются на компоненты [1]: бумага, картон, пищевые отходы, дерево, металл (черный и цветной), текстиль, кости, стекло, кожа, резина, камни, полимерные материалы, прочие (неклассифицируемые) фракции, а также отсев менее 15 мм. Морфологический состав ТБО может существенно меняться в зависимости от различных факторов — климатических, сезонных, социальных, экономических.

Будем называть «типичным» состав ТБО такого типа:

Компонент	% вес.
Бумага, картон	33–40
Пищевые отходы	26–32
Дерево, листья	1,5–5
Металл черный	2,5–3,6
Металл цветной	0,4–0,6
Кости	0,9–1,5
Кожа, резина	0,8–1,3
Текстиль	4,6–6,5
Стекло	2,7–4,3
Камни, керамика	0,7–1,0
Полимерные материалы	4,6–6,0
Отсев менее 15 мм	8,8–11,2

В среднем ТБО характеризуется 50 %-ной влажностью и 45 %-ным содержанием органической составляющей. Твердые бытовые отходы — это богатый источник вторичных ресурсов (в том числе черных, цветных, редких и рассеянных металлов), а также «бесплатный» энергоноситель, так как бытовой мусор — возобновляемое углеродсодержащее энергетическое сырье для топливной энергетики. Трудности в использовании ТБО заключаются в отдельных свойствах, не позволяющих эффективно их применять без предварительной переработки. Поэтому при анализе отходов определяют в первую очередь их влажность, а также содержание летучих веществ, углерода и золы. Химический состав типичных твердых бытовых отходов следующий [1]:

Элемент	Содержание, масс. %
Влага	26,04
Углерод	27,23
Водород	3,85
Кислород	21,49
Азот	0,28
Хлор	0,20
Сера	0,26
Зола	20,63

В зависимости от морфологического состава смеси и климатических условий низшая теплота сгорания ТБО колеблется в пределах 5000–8000 кДж/кг.

В осенний период при наибольшей влажности низшая теплота сгорания ТБО имеет наименьшую величину. Повышенная влажность определяется высоким содержанием пищевых отходов, а также тем, что дождь смачивает содержимое открытых контейнеров.

Примерно 80 % отходов относится к горючим материалам, из которых 65,6 % имеют биологическое происхождение. Это бумага, пищевые и животные отходы. Следует иметь в виду, что процентное соотношение отдельных компонентов колеблется в зависимости не только от времени года, но и от района, что составляет основную проблему при использовании отходов в качестве источника энергии.

Содержание углерода и водорода в твердых бытовых отходах может быть довольно высоким (в данном случае 31,08 %). Наиболее существенной характеристикой таких отходов с учетом возможного их использования в качестве топлив можно считать низкое содержание серы — 0,26 %, что значительно ниже, чем, к примеру, в бурых углях, где содержание серы может достигать нескольких процентов. Содержание азота с точки зрения образования его оксидов при обычном сжигании отходов также не вызывает опасений. Однако не все собранные отходы могут быть использованы для получения энергии.

Повышение низшей теплоты сгорания ТБО

В связи с разнородностью твердых бытовых отходов, а также разнообразием условий окружающей среды, социальными, техническими и другими ограничениями в большинстве случаев, прежде чем использовать твердые бытовые отходы в качестве топлива, их необходимо обогатить.



Обогащение может быть произведено вручную или механически. Современный механический способ обогащения всех отходов обычно включает воздушную и магнитную сепарацию и грохочение. Последовательность операций и время, расходуемое на каждую из них, могут быть различными. В результате указанных операций от перерабатываемой массы отходов отделяются металлы и стекло, таким образом обогащается органическая часть. Судя по данным, приведенным в таблице [1], можно говорить о том, что в результате обогащения и осушки теплота сгорания топлива, полученного из отходов, увеличивается, приближаясь к теплоте сгорания угля, а содержание влаги и золы снижается.

Технологии переработки ТБО

Известны четыре основных подхода к использованию ТБО: захоронение, сжигание, компостирование и переработка с получением коммерческого продукта. В мировой практике применяются около 20 методов обезвреживания и утилизации отходов. Методы обезвреживания и переработки по конечной цели делятся на ликвидационные (решающие в основном санитарно-гигиенические задачи) и утилизационные (решающие задачи экономики — использование вторичных ресурсов), а по технологическому принципу — на биологические, термические, химические, механические, смешанные. Эти методы не нашли значительного распространения в нашей стране в связи с их технологической сложностью и высокой себестоимостью переработки отходов.

Захоронение ТБО на полигонах. В нашей стране из существующих различных методов обезвреживания ТБО наибольшее распространение получил метод захоронения отходов в грунте (на организованных и неорганизованных полиго-

нах — свалках). Полигон — наиболее простой и дешевый — устраивают там, где основанием могут служить глины и тяжелые суглинки. Там, где это невозможно, приходится устраивать специальное водонепроницаемое основание, что приводит к существенным дополнительным затратам, но кардинально не решает проблему. Площадь земельного участка выбирается с условием его эксплуатации в среднем 15–20 лет. Находить площади в 40–200 га вблизи городов, особенно крупных мегаполисов, становится все труднее. Следует отметить, что захоронение на полигоне приводит к образованию пыли и распространению неприятных запахов. Полигон наряду с фильтратом, загрязняющим водоисточники, выбрасывает в атмосферу метан и другие токсичные газы, что не только загрязняет воздух вблизи полигона, но и (по последним исследованиям) отрицательно влияет на озоновый слой земли. Кроме того, при захоронении на полигоне теряются все ценные утильные вещества и компоненты.

Мусоросжигательные заводы (МСЗ) получили значительное распространение в странах с высокой плотностью населения и большим дефицитом свободных площадей: в Германии сжигается до 35 % ТБО, во Франции — 42 %, в Японии — 75 %. Однако в последние годы эти цифры имеют тенденцию к значительному снижению, так как метод полного сжигания ТБО неэкологичен. Один из недостатков мусоросжигательных заводов — трудность очистки выходящих в атмосферу газов от вредных примесей, особенно от диоксинов. Во-вторых, он чрезвычайно дорог и неэкономичен не только с точки зрения затрат на строительство, но и в эксплуатации с соблюдением всех санитарных норм. Мусоросжигательные заводы значительно превосходят любые иные мусороперерабатывающие предприятия по капитальным и эксплуатационным затратам

Характеристики топлив, полученных из отходов, и угля

Вид топлива	Влага, %	Зола, %	Теплота сгорания, кДж/кг	
			до осушки	после осушки
Топливо, полученное из твердых отходов:				
до обогащения	22,5	17,3	12111	15627
после обогащения	16,3	7,8	15541	18568
Уголь	12,5	2,8	26875	—

(стоимость утилизации составляет не менее 220–240 руб./т). Сложная задача при эксплуатации таких заводов наряду с очисткой отходящих газов — утилизация или захоронение остающихся после сжигания (до 30 % от сухой массы отходов) токсичной золы и шлака. В-третьих, вариант со сжиганием ТБО находится вне современных тенденций, главная цель которых — ресурсо- и энергосбережение.

Поскольку в российских условиях затраты на сжигание ТБО пятикратно превышают затраты на захоронение, то последнее остается наиболее распространенным методом утилизации ТБО в нашей стране.

Компостирование. В некоторых европейских странах (Франция, Италия и др.) эксплуатируются заводы, работающие по технологии аэробного биотермического компостирования. По этой технологии ТБО вступают в естественный круговорот веществ в природе, обезвреживаются и превращаются в компост. Данные предприятия отличаются весьма сложным технологическим циклом, требуют значительных капитальных затрат и не снимают основных проблем по санитарной очистке городов.

Переработка с получением коммерческого продукта. Анализ морфологического состава ТБО

(см. выше) показывает, что бытовые отходы чаще всего представляют смесь горючих, требующих переработки, и негорючих отходов.

Сортировка ТБО дает возможность исключить негорючие отходы, получить ценное вторичное сырье, исключить хлор-, фторсодержащие и иные токсичные вещества из состава сырья, которое используется в качестве топлива для газогенераторов. Это значительно сокращает выброс вредных веществ с дымовыми газами, образующимися при сжигании. Получаемый генераторный газ может быть использован в тепловых двигателях для выработки электрической энергии и в энергетических котлах для производства тепловой энергии.

Исходя из описанных выше методов переработки ТБО наиболее перспективным с экологической, экономической и социальной точек зрения следует считать метод переработки отходов с использованием технологии газификации. Кафедра промышленной теплоэнергетики СПбГПУ имеет значительный опыт в разработке слоевых газогенераторов, преимущества которых — простота эксплуатации и универсальность с точки зрения использования исходного топлива.

Газогенератор УТГ-600

Газогенератор УТГ-600 (рис. 1) обращенного типа предназначен для термохимической переработки растительного сырья, торфа, бурых углей, сельскохозяйственных и бытовых отходов в горючий газ.

Получаемый газ может быть использован в качестве топлива в любых энергетических установках (топки котлов, сушилок и т. д.), двигателях внутреннего сгорания, а также в качестве энергоносителя в технологических схемах.

В средней части шахта газогенератора имеет зону горения, в которую через 12 фурун подается воздух. Над зоной горения происходит сушка и термическое разложение органической части топлива. Верхняя часть шахты служит буферным бункером загруженного топлива. Под зоной горения находится зона реакции, в которой продукты сгорания топлива, избыток воздуха и пары воды при взаимодействии с раскаленным углем образуют генераторный газ.

Номинальная тепловая мощность данного газогенератора составляет 600 кВт.

На рис. 2 представлена тепловая схема установки со слоевым газогенератором УТГ-600,

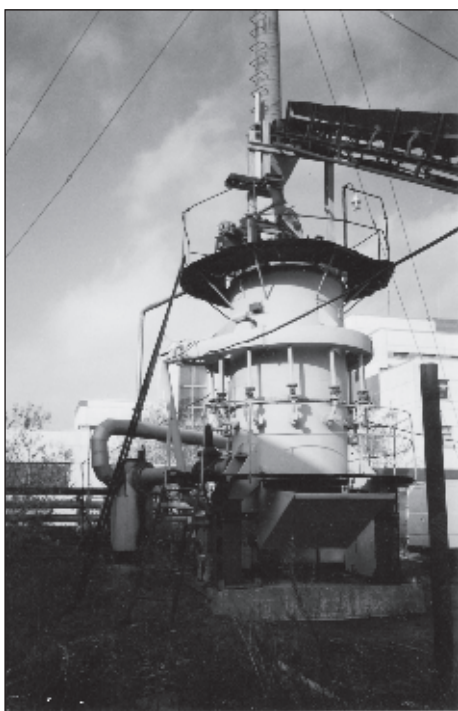


Рис. 1. Газогенератор УТГ-600

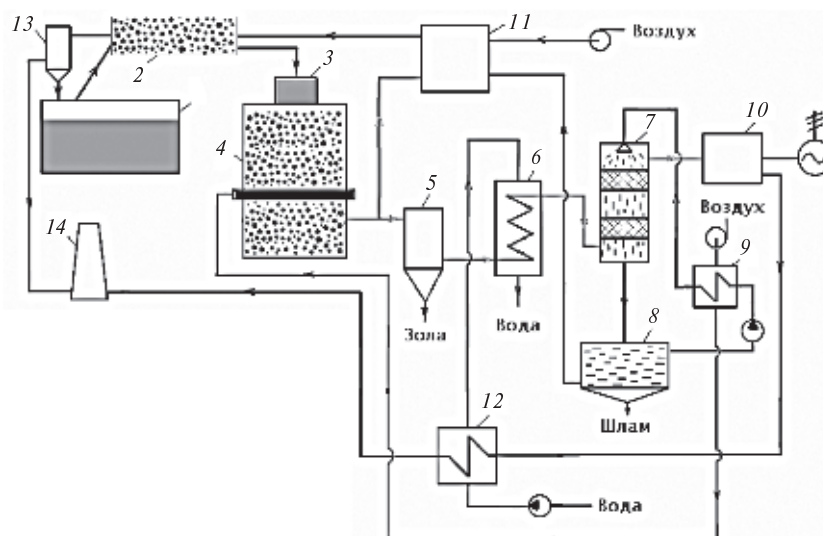


Рис. 2. Схема газогенераторной дизельной электростанции

1 — склад ТБО; 2 — система подготовки топлива; 3 — питатель; 4 — газогенератор; 5 — циклон; 6 — газовойодяной теплообменник; 7 — насадочный скруббер; 8 — отстойник воды; 9 — теплообменник; 10 — дизель-генератор; 11 — циклонная топка; 12 — теплообменник; 13 — циклон; 14 — дымовая труба

в которой может быть использовано отсортированное топливо.

Установка работает следующим образом. Со склада 1 твердые бытовые отходы подаются транспортером в систему подготовки топлива 2. Подсушенные и отсортированные ТБО через шлюзовый питатель 3 транспортером загружаются в газогенератор 4. Газогенератор, работающий под избыточным давлением 2,0 кПа, вырабатывает низкокалорийный газ ($T_{\text{газа}} = 750^\circ\text{C}$, $Q^p_{\text{н}} = 4,4 \text{ МДж/м}^3$), содержащий пылевидные частицы и смолы в парообразном виде. Для грубой очистки генераторного газа используется циклон 5. Охлаждение газа до температуры 200°C производится в газовойодяном теплообменнике 6. Улавливание остаточных пылевидных частиц и смол происходит в скруббере насадочного типа 7, в который для повышения степени очистки и охлаждения газа до температуры 40°C подается вода. Очищенный генераторный газ поступает в дизель-генератор 10. Продукты сгорания топлива на выходе из двигателя имеют температуру 450°C . Их физическое тепло используется в котле-утилизаторе 12 для нагрева воды, поступающей через газовойодяной теплообменник 6 к потребителю. При очистке генераторного газа в скруббере образуются грязные смольные воды с температурой около 65°C . Они расслаиваются в отстойнике воды 8 и после охлаждения в тепло-

обменнике 9 подаются снова в скруббер. Так как в скруббере конденсируется влага из генераторного газа, то требуется удалить избыточную влагу из контура циркуляции воды. Для этого она вместе со шламами впрыскивается и испаряется в топке. Работа установки обеспечивается вспомогательным оборудованием: вентиляторами, насосами, КИП, запорной и регулирующей арматурой.

Данная схема позволяет создавать энергетические модули различной мощности: от 100 кВт до 3 МВт, что позволит перерабатывать до 100 тонн ТБО в сутки.

Газификация ТБО, положенная в основу данной технологии, служит альтернативой прямому сжиганию отходов. Весь процесс происходит в герметичном объеме газогенератора и соответственно без вредных выбросов в атмосферу. Образующаяся зола не содержит вредных компонентов и может использоваться, к примеру, в сельском хозяйстве.

Таким образом, кроме энергетического аспекта, следует отметить экологическую направленность технологии и рекомендовать ее в качестве базовой для решения проблемы переработки твердых бытовых отходов.

Исследования были проведены при финансовой поддержке в форме гранта Правительства Санкт-Петербурга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дарулис, П.В.** Отходы областного города. Сбор и утилизация [Текст] / П.В. Дарулис.— Смоленск, 2000, 520 с.

2. Сб. статей по опыту управления муниципальными отходами / Т. Филкова, Т. Мусуралиев, М. Рогожин и др.— Бишкек, 2006.— 248 с.

УДК 621.83:681.51

Ю.С. Усынин, В.В. Остроухов

ПРИМЕНЕНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В МЕХАНИЗМАХ ПОДАЧИ СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

Станы холодной прокатки труб (ХПТ) предназначены для производства холоднокатаных труб из легированных и нержавеющей сталей. Эти трубы используются в авиации, атомной энергетике и автомобилестроении. Например, на Челябинском трубопрокатном заводе (ОАО «ЧПТЗ») на стане ХПТ-450П2 производят трубы-ланжероны для сверхтяжелого вертолета МИ-26.

При холодной прокатке труб на коническую оправку надевают цилиндрическую заготовку и обжимают валками (рис. 1). При каждом двойном ходе клетки производят подачу трубы в область прокатки, поворот трубы и оправки [1].

Подачу и поворот трубы осуществляет группа поворотно-подающих механизмов (ППМ). По имеющимся данным от 10 до 40 % простоев

станов ХПТ связаны с отказами ППМ. Анализ показал, что среди различных видов приводов ППМ (механические, гидравлические и электрические) электропривод обладает наилучшими эксплуатационными характеристиками, в первую очередь — надежностью и гибкостью в управлении, поэтому он рассматривается в качестве основного варианта [2].

Целью нашей работы было повышение производительности, надежности механизма подачи стана ХПТ-450 и качества выпускаемой продукции за счет применения индивидуального электропривода. Стан ХПТ-450 — самый большой стан холодной прокатки, и многие его параметры являются предельными, что представляет научный интерес. К механизму подачи по

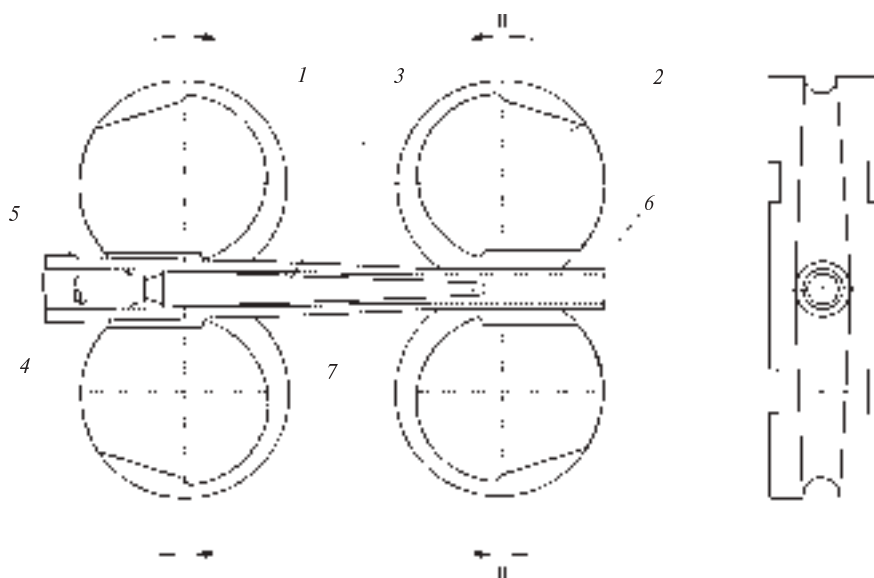


Рис. 1. Схема холодной прокатки труб на стане валкового типа

сравнению с другими механизмами поворотноподдающей группы предъявляются самые высокие технологические требования.

Однако применение стандартного промышленного электропривода для решения этой задачи осложнено высокими требованиями к быстродействию механизма: время подачи трубы составляет всего 0,3 с, при этом электроприводу необходимо переместить механизм с трубой весом до 20 т с заданной точностью 0,1 мм.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) разработать математическую модель механизма подачи;
- 2) выбрать тип и параметры силового оборудования;
- 3) выбрать метод управления электроприводом;
- 4) выполнить моделирование системы с целью проверки соответствия требованиям технологии.

Механизм подачи состоит из двигателя, цилиндрического редуктора и винтовой передачи (рис. 2). При создании математической модели были учтены податливости винта и трубы [3].

Однако полученная математическая модель трехмассовой колебательной системы достаточно сложна для дальнейшего анализа.

Для упрощения полученной математической модели применялся метод декомпозиции электромеханических систем, при этом анализировались влияния отдельных частей кинематической схемы на работу всей системы. Авторы использовали логарифмические частотные характеристики и частоты среза локальных контуров, поскольку они дают прямой выход на параметры конструкции механизма [4].

Было выявлено незначительное влияние упругости трубы на работу механизма, поэтому математическая модель была упрощена заменой упругости трубы на элемент с бесконечно боль-

шой жесткостью. Определяющим оказалось влияние электромеханической постоянной времени двигателя.

Следующая задача — выбор оптимальных параметров силового оборудования. Эта задача разделялась на две: достижения максимального быстродействия и увеличение точности позиционирования.

Рассмотрим первую задачу. Обычно рассматривают отдельные факторы, влияющие на быстродействие: габариты, мощность, передаточное число редуктора, вид диаграммы скорости и момента, значения максимальной скорости и ускорения. Однако в реальности все эти факторы действуют одновременно. Для того чтобы выявить влияние каждого фактора, был предложен анализ по экспериментальным осциллограммам тока и скорости.

Осциллограммы перемещения электропривода можно разбить на семь участков (рис. 3). На каждом участке можно выделить факторы, оказывающие наибольшее влияние на его длительность. Длительность участка 0—1 определяется быстродействием контура регулирования тока, участка 1—2 — величиной максимальной скорости. На отрезке времени 2—3 темп спада тока якоря определяется быстродействием контура регулирования скорости. Участок 3—4 соответствует постоянной максимальной скорости вращения двигателя. На участке 4—7 происходит уменьшение сигнала на выходе регулятора положения, что приводит к торможению электропривода. Отрезок времени 4—6 формируется изменением величины задания регулятора скорости, поэтому время на нем определяется быстродействием контура регулирования скорости. Наконец, спадание тока якоря до нуля в конце переходного процесса (участок 6—7) определяется быстродействием контура регулирования положения.

Анализ осциллограмм, полученных во время наладочных работ механизма подачи стана

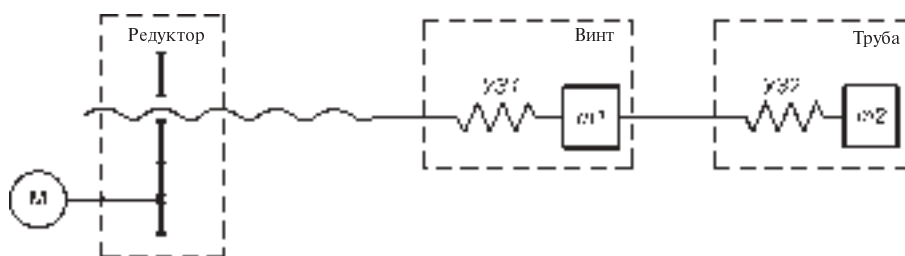


Рис. 2. Расчетная кинематическая схема

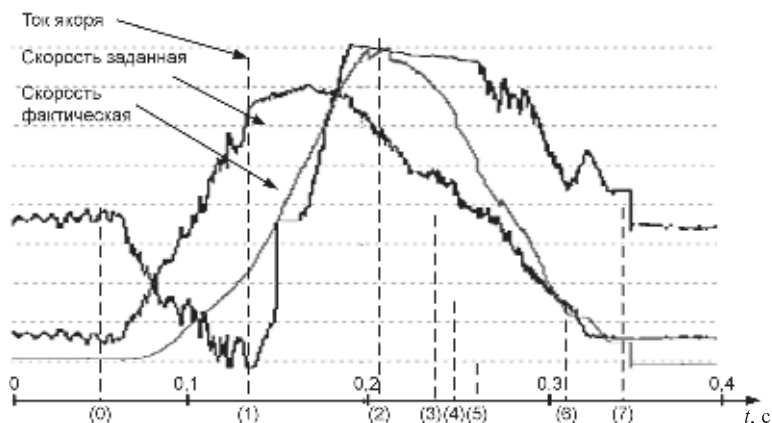


Рис. 3. Осциллограммы тока якоря и скорости двигателя механизма подачи трубы стана ХПТ-450П1

ХПТ-450П1 ОАО «ЧТПЗ», выявил значительное влияние выбора максимальной скорости и номинального ускорения на время позиционирования.

Исследование зависимости времени позиционирования от максимальной скорости и ускорения показало возможность снижения максимальной скорости на 40 %, что давало существенный выигрыш в габарите электродвигателя, при этом время позиционирования увеличивалось не более чем на 10 %.

Изменение максимального ускорения в пределах 10 % приводило к изменению времени позиционирования более чем на 5 %. Реальные возможности по уменьшению времени регулирования ограничены предельными динамическими усилиями в механизме.

Анализ возмущений, влияющих на точность позиционирования механизма, установил значительное влияние явления срыва трубы с оправки. Значение усилия срыва трубы с оправки уточнено по экспериментальным данным, полученным на стане ХПТ-450П1 ОАО «ЧТПЗ».

Была создана математическая модель процесса. На модели рассматривалось неупругое соударение эквивалентной поступательной массы электропривода и трубы. Анализ показал, что для снижения разброса величины подачи трубы желательно уменьшение передаточного числа редуктора.

Среди рассмотренных типов электропривода (приводы постоянного тока, синхронный, асинхронный, с машиной двойного питания) для механизмов ППМ был признан оптимальным синхронный электропривод, поскольку он обла-

дает наилучшими динамическими характеристиками, а промышленность выпускает широкую номенклатуру электродвигателей и преобразователей частоты для них [5, 6].

В качестве базового варианта рассматривался тиристорный преобразователь частоты с непосредственной связью (ПЧНС), используемый сейчас на станах ХПТ-450. Статические и динамические характеристики тиристорных преобразователей, которым свойственны неполная управляемость и дискретность процессов, описаны в литературе. В этих работах рассматриваются системы с совместным управлением вентильными группами или идеализированные преобразователи, где задержка на переключение групп равна нулю. Однако реальный опыт наладки преобразователя частоты электропривода подачи стана ХПТ-450П1 показывает существенное влияние именно задержки переключения на работу электропривода.

Для исследования этой проблемы была разработана математическая модель преобразователя с учетом задержки переключения вентильных групп в виде статической нелинейной характеристики выходного сигнала. Частотные характеристики, полученные с помощью этой математической модели, показывают значительное снижение коэффициента передачи и увеличение фазового сдвига выходного сигнала преобразователя на частотах, близких к частотам рабочего диапазона электропривода, что приводит к значительному снижению момента двигателя.

Вторая проблема, выявленная во время пуско-наладочных работ на стане ХПТ-450П1, связана с дискретностью цифровой системы управ-



ления и вносимой ею фазовой задержкой. Эта дополнительная фазовая задержка не позволяет создать замкнутый контур регулирования тока с высоким быстродействием, усложняет проблему с задержкой на переключение вентильных групп и не дает возможность линеаризовать статическую характеристику преобразователя [7].

Полученные результаты говорят о том, что ПЧНС не удовлетворяет современным требованиям, предъявляемым к электроприводу поворотных-подающих механизмов станов холодной прокатки труб. Более перспективны для этого преобразователи частоты с автономными инверторами и транзисторными ключами. Предполагается, что использование полностью управляемых вентилях и более высокой частоты модуляции позволит решить проблему с инерционностью контура тока и создать более надежный и производительный привод для механизмов ППМ.

Однако проведенное исследование рынка выпускаемых современной промышленностью электроприводов показало, что сейчас нет преобразователей частоты с необходимыми техническими характеристиками.

Крупнейшим фирмам (Control Techniques — Англия/США, ABB — Германия, Siemens — Германия) был задан вопрос о возможности приобретения у них преобразователя частоты для синхронного позиционного электропривода со следующими техническими характеристиками: мощностью 500 кВт; номинальным током 1 кА и максимальным до 2 кА; ПВ 10 %; возможностью разгона и остановки привода по заданной тахограмме за время одного цикла перемещения 0,3 с; точностью позиционирования механизма 0,4 %; возможностью рекуперации энергии в сеть.

Представители всех трех компаний ответили, что преобразователей частоты для синхронных двигателей на такую мощность они не выпускают. Сейчас на рынке преобладают преобразователи частоты для асинхронных двигателей и есть решения для позиционного электропривода на базе асинхронных электродвигателей, однако никто из представителей фирм не дал гарантии, что они смогут обеспечить требуемое быстродействие.

Преобразователи частоты для синхронных электроприводов выпускают только применительно к электродвигателям с возбуждением от постоянных магнитов. Однако эти электропри-

воды рассчитаны на небольшие мощности (в пределах нескольких десятков киловатт); область их применения — высокоточные станки с ЧПУ и промышленные роботы [8].

Несмотря на значительный прогресс в области регулируемого электропривода переменного тока, микропроцессорной техники и силовой электроники, на рынке серийно выпускаемых электроприводов нет готовых решений, удовлетворяющих требованиям поворотных-подающих механизмов станов ХПТ, поэтому здесь требуется разработка и изготовление по индивидуальному заказу.

В нашем исследовании получены следующие результаты:

1. Разработана математическая модель механизма подачи стана ХПТ-450, учитывающая податливости элементов механизма.

2. Применение разработанного метода декомпозиции позволило упростить математическую модель за счет выявления ее элементов, оказывающих минимальное влияние на работу механизма, и их замены с помощью предельного перехода. Такой метод декомпозиции применим для широкого класса электромеханических систем. Он позволяет эффективно исследовать влияние конструктивных параметров на работу системы посредством анализа частотных характеристик.

3. Предложен метод оптимизации быстродействия электропривода на основе экспериментальных осциллограмм переходных процессов. Применение метода к данным, полученным во время пуско-наладочных работ на стане ХПТ-450 ПАО «ЧТПЗ», позволило разработать рекомендации по выбору максимальной скорости и ускорения электропривода.

4. На основе предложенного метода анализа влияния возмущающих воздействий было выявлено, что на точность позиционирования механизма значительно влияют явления срыва трубы с оправки. Анализ разработанной математической модели срыва трубы с оправки позволил дать рекомендации по выбору передаточного числа редуктора и уточнить величину усилия срыва.

5. На основе анализа характеристик различных типов электроприводов, а также исследования динамики ПЧНС, используемых сегодня на станах ХПТ-450, даны рекомендации по выбору типа электропривода и преобразователя частоты.

Эти результаты могут быть использованы при модернизации существующих станков ХПТ, а также при разработке новых. Предложенные методики анализа сложных электромеханических систем применимы к широкому классу механизмов.

Работа проводится в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по проблеме «Энергосберегающие электроприводы на основе новых типов электрических машин и вентильных преобразователей» (конкурс НК 151П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кофф, З.А.** Холодная прокатка труб [Текст] / З.А. Кофф, П.М. Соловейчик, В.А. Алешин, М.И. Гриншпун. — Свердловск: Металлургиздат, 1962. — 431 с.
2. **Остроухов, В.В.** Электропривод поворотно-подающих механизмов станков холодной прокатки труб [Текст] / В.В. Остроухов // Научный поиск: Матер. первой науч. конф. аспирантов и докторантов. — Технические науки. — Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2009. — С. 219–223.
3. **Остроухов, В.В.** Математическая модель неизменяемой части электропривода механизма подачи трубы стана ХПТ-450 [Текст] / В.В. Остроухов // Сб. науч. тр. 61-й науч. конф. проф.-препод. состава ЮУрГУ: Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. — С. 34–38.
4. **Усынин, Ю.С.** Декомпозиция электромеханической системы механизма подачи трубы стана ХПТ-450 [Текст] / Ю.С. Усынин, В.В. Остроухов / Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — 2010. — Вып. 11. — № 2(178). — С. 41–45.
5. **Вейнгер, А.М.** Регулируемый синхронный электропривод [Текст] / А.М. Вейнгер. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 224 с.
6. **Слежановский, О.В.** Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями [Текст] / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов [и др.]. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 256 с.
7. **Остроухов, В.В.** Влияние инерционности преобразователя частоты на качество процессов в электроприводе подачи стана холодной прокатки труб [Текст] / В.В. Остроухов // Наука и инновации в технических университетах: Матер. IV Всеросс. форума студентов, аспирантов и молодых ученых. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — С. 10–11.
8. **Druru, B.** The Control Techniques Drives and Controls Handbook [Текст] / B. Druru, UK. — London. — The Institution of Electrical Engineers. — 2001. — 374 p.

УДК 536.245

*К.Д. Андреев, В.Г. Полищук,
В.А. Рассохин, Н.П. Соколов*

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ТЕПЛООТДАЧИ В ПРЯМЫХ ЩЕЛЕВЫХ КАНАЛАХ С УПОРЯДОЧЕННЫМИ СИСТЕМАМИ СФЕРИЧЕСКИХ УГЛУБЛЕНИЙ

С увеличением энергетических мощностей и объемов производства растут масса и габариты теплообменных аппаратов, уменьшение которых — актуальная проблема. Наиболее перспективным путем ее решения может стать интенсификация процесса в теплообменниках различного назначения. Разработка и всестороннее исследование наиболее эффективных

в термодинамическом отношении теплообменных поверхностей остаются задачами важными и актуальными [1].

Информация об упорядоченной системе сферических углублений (так называемых лунок) на обтекаемых поверхностях как о новом способе интенсификации обменных процессов впервые поступила в 80-х годах XX века из Института



атомной энергии (ИАЭ) им. И.В. Курчатова от коллектива исследователей, возглавляемого Г.И. Кикнадзе. Этим коллективом были изучены особенности обтекания одиночных сферических углублений и регулярных рельефов из них, нанесенных на исходно гладкую поверхность изотермических или нагреваемых тел [2].

После публикации работ ИАЭ факт самоорганизации и устойчивого существования смерчевых структур на поверхностях с упорядоченной системой сферических углублений (облуненных поверхностях) в широком диапазоне режимов их обтекания потоками жидкости и газа проверен и подтвержден в исследованиях многих ведущих научных и промышленных центров России (МВТУ, ИТФСО АН, ИПФ АН, ВНИИНМ, НИКИЭТ и др.), в которых существенно развиты и дополнены представления об этом явлении [2–4].

Авторским коллективом во главе с академиком А.И. Леонтьевым с исчерпывающей полнотой раскрыт физический механизм интенсификации теплоотдачи на облуненной поверхности при ламинарном и турбулентном ее обтекании с присоединением и без присоединения потока, оторвавшегося с края лунки, к ее донной поверхности [5]. В монографии [6] авторского коллектива из Казани изложены результаты опытного исследования интенсификации теплоотдачи сферическими выемками при воздействии таких возмущающих факторов, как положительный или отрицательный градиент давления, уровень турбулентности внешнего потока и продольная кривизна поверхности.

Большой комплекс работ по численному моделированию гидродинамики и теплообмена на облуненных поверхностях был выполнен в Санкт-Петербургской академии гражданской авиации под руководством профессора С.А. Исаева [7]. В расчетных исследованиях использовался многоблочный алгоритм решения уравнений Рейнольдса и энергии на основе структурированных сеток с их частичным перекрытием и применением зональной k, ω -модели переноса сдвиговых напряжений. Результаты расчетов позволяли детально проанализировать механизм смерчевой интенсификации теплообмена в лунках различной глубины.

С участием сотрудников ЦКТИ были выполнены экспериментальные исследования эффективности теплообменников с облуненными по-

верхностями применительно к высоковязким жидкостям ($3 < Pr < 60$) [8].

Появились и отдельные работы, в которых по результатам экспериментальных исследований было зарегистрировано уменьшение коэффициентов трения в канале с поверхностями, имеющими упорядоченную систему сферических углублений (лунки), при некоторых соотношениях геометрических размеров систем лунок [4, 9].

Поэтому в предлагаемой статье рассматриваются полученные опытным путем закономерности изменения коэффициентов гидравлического сопротивления и теплоотдачи в прямых каналах прямоугольного поперечного сечения с упорядоченными системами лунок.

Объекты исследования, методика обработки и обобщения опытных данных

Для исследования трения на поверхностях с регулярными рельефами из сферических углублений использовались только плоские щелевые каналы. Все каналы имели одинаковую абсолютную ($B = 50 \cdot 10^{-3}$ м), но большую относительную ($\bar{B} = B/H = 10-50$) ширину, при которой гидравлический диаметр $d_{г0}$ базового канала фактически равен двум высотам H щели (см. рис.).

Система сферических углублений увеличивает поверхность теплообмена F и объем канала V относительно их исходных величин F_0 и V_0 в канале с гладкими стенками (без лунок).

Геометрические характеристики всех экспериментальных моделей для исследования гид-

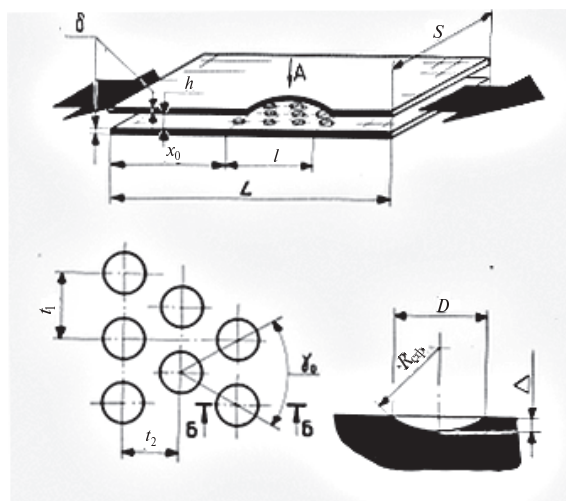


Рис. 1. Схема щелевого канала со сферическими лунками на теплопередающей поверхности

равлического трения и теплообмена на поверхностях щелевого тракта с регулярными рельефами из сферических углублений практически были идентичными. Использовались лунки с различными величинами радиуса сферы $R = (0,8-11,5) \cdot 10^{-3}$ м, диаметра отпечатка $D = (1,4-6,0) \cdot 10^{-3}$ м, глубины $h = (0,3-1,5) \cdot 10^{-3}$ м и продольного шага $S_x = (2,2-9,6) \cdot 10^{-3}$ м.

Для обработки опытных данных применялись параметры (геометрические симплексы):

- $\bar{F} = \frac{\pi D^2}{4 S_x S_y}$ — плотность размещения лунок на поверхности;
- $\bar{h} = h / D$ — относительная глубина лунок;
- $\bar{H} = H / D$ — относительная высота канала над поверхностью с лунками;
- $\bar{r} = r / R$ — относительный радиус сопряжения лунок с базовой поверхностью канала;
- $\bar{\Pi} = \Pi / \Pi_0$ — относительная доля периметра Π_0 поперечного сечения канала, занятая рельефом из сферических углублений;
- $\bar{X} = X / d_r$ — относительная протяженность поверхности с рельефом из сферических углублений до контрольного сечения X канала;
- СР — особенности размещения лунок на поверхности канала: шахматное (ш) или коридорное (к); на одной стороне (о) или на обеих (д) поверхностях канала (например, щелевого) и др.

Исследование теплообмена в модельных каналах выполнялось методом калориметрирования в жидкометаллическом термостате. Метод основан на измерении средних тепловых потоков по массе и локальных тепловых потоков по толщине цинковой корки, замороженной на наружную горячую поверхность объекта исследования при продувке его воздухом в расплаве кристаллизующегося цинка [10].

Исследования выполнялись в условиях постоянства температуры стенки ($T_w = \text{const}$) при больших величинах плотности теплового потока $q_w \gg 2 \cdot 10^4$ Вт/м² и температурного напора ($\Delta T = T_w - T_f = 200-400$ К) при $\bar{T}_w = T_w / T_f \leq 2,2$.

Величина массовой скорости $\rho w = G / f$ при определении величин чисел $Re_d = \rho w d_r / \mu$ вы-

числялась по исходной площади $f = BH$ поперечного сечения потока без учета влияния сферических углублений. При определении числа Re_d на контрольной длине L участка с лунками величина гидравлического диаметра d_r вычислялась с учетом влияния рельефа сферических углублений на объем и поверхность канала:

$$d_r = d_0 \frac{V}{V_0} \frac{F_0}{F}; \quad d_0 = 2 \frac{BH}{B + H}.$$

Цель гидравлических испытаний — измерение коэффициента гидравлического сопротивления λ_Σ контрольного участка L канала в формулировке уравнения Бернулли для сжимаемых потоков

$$\lambda_\Sigma \frac{dL}{d_r} \frac{\rho w^2}{2} + dp + d \left(\frac{\rho w^2}{2} \right) = 0, \quad (1)$$

которое с учетом уравнения неразрывности позволяет вычислить

$$\lambda_\Sigma = \left[\frac{\Delta p (p_{\text{н.к.}} + p_{\text{н.л.к.}})}{RT} \left(\frac{G}{f_k} \right)^{-2} - \ln \frac{p_{\text{н.к.}}}{p_{\text{н.л.к.}}} \right] \left(\frac{L}{d} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где G и f_k — массовый расход потока и площадь поперечного сечения канала; L и d_r — длина контрольного участка и гидравлический диаметр канала, определенный с учетом влияния рельефов сферических углублений на объем V и площадь F поверхностей канала; R , T , p — газовая постоянная, температура и давление рабочего тела; $\Delta p = p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}}$ — изменение (потери) статического давления в потоке рабочего тела на контрольной длине L канала.

При вычислении искомых величин коэффициента теплоотдачи (осредненное на длине L исследуемого участка — $\bar{\alpha}$; в поперечном сечении этого участка — α) измеренные величины суммарного Q_Σ , Вт, или локального в данном поперечном сечении Q , Вт/м, теплосъема относились к фактической площади теплоотдающей поверхности с учетом влияния на нее рельефа из сферических углублений, а величины $\bar{\alpha}$ и α определялись следующим образом:

$$\bar{\alpha} = \frac{Q_\Sigma}{F} (\Delta T)^{-1} = \frac{Q_\Sigma}{LS} [\Delta T (F / F_0)]^{-1};$$

$$\alpha = \frac{Q}{B} (\Delta T)^{-1} = \frac{Q_\Sigma}{BL} [\Delta T]^{-1}.$$



По результатам измерений α_i определялись соответствующие им числа Нуссельта —

$$\text{Nu}_d = \frac{\alpha d}{\lambda} \text{ и } \text{Nu}_x = \frac{\alpha X}{\lambda} = \text{Nu}_d \frac{X}{d},$$

где X — координата вдоль длины, на которой определяются локальные числа Рейнольдса и Нуссельта; Nu_d — число Нуссельта, определенное по гидравлическому диаметру; Nu_x — критерий Нуссельта, определенный по характерному размеру — продольной координате X вдоль длины канала.

Для каждой испытанной модели формировались зависимости

$$\text{Nu}_d \text{Pr}^{-0,4} \bar{T}_w^{0,55} \Phi(\text{Re}_d), \quad \text{Re}_d = \frac{\rho w d_r}{\mu};$$

$$\text{Nu}_x \text{Pr}^{-0,4} \bar{T}_w^{0,55} = \Phi(\text{Re}_x),$$

$$\text{Re}_x = \frac{\rho w X}{\mu} = \text{Re}_d \frac{X}{d}.$$

Измеренные в испытаниях величины коэффициента гидравлического сопротивления λ_Σ на контрольных участках L щелевого тракта представлялись в виде зависимости от числа $\text{Re}_d = \rho w d_r / \mu$.

Результаты экспериментальных исследований теплообмена на обтекаемых поверхностях, формованных упорядоченными рельефами из сферических углублений, обрабатывались в соответствии с эмпирической моделью зависимостью

$$\text{Nu} = \Phi[\text{Re}, \text{Pr}, \bar{T}_w, \bar{F}, \bar{\Delta}, \bar{H}, \text{CP}], \quad (3)$$

которая отражает роль в теплообмене режимных параметров потока (Re , Pr и \bar{T}_w), геометрических характеристик как рельефа (D , Δ , S_1 , S_2), так и самого канала (\bar{H} , B , d_r), способа размещения лунок CP на поверхности канала.

Будем полагать, что воздействия трения на гладких поверхностях (λ_0) и на поверхностях с регулярными рельефами из сферических лунок (λ) на суммарные потери давления Δp в щелевом тракте с разнородными поверхностями стенок самостоятельны, независимы и не влияют друг на друга. Тогда величины λ_Σ , λ_0 и λ можно связать соотношением

$$\lambda_\Sigma = \lambda_0(1 - \bar{\Pi}) + \lambda \bar{\Pi}. \quad (4)$$

Поэтому в выполненных экспериментальных исследованиях искомый коэффициент гидравли-

ческого трения λ и эффект интенсификации трения Ψ_λ непосредственно на поверхности с регулярными рельефами из сферических углублений определялись с использованием соотношения (4) по результатам выполненных измерений коэффициента суммарного гидравлического сопротивления λ_Σ :

$$\lambda = \lambda_0 + (\lambda_\Sigma - \lambda_0) / \bar{\Pi}, \quad (5)$$

$$\Psi_\lambda = 1 + \left(\frac{\lambda_\Sigma}{\lambda_0} - 1 \right) / \bar{\Pi}. \quad (6)$$

Результаты опытного исследования коэффициентов трения

Установочные опыты. Результаты измерений коэффициентов трения λ на гладких стенках щелевых трактов представлены в виде зависимости λ_0 от числа Re_d . Соответствие измеренных для выбранных моделей величин λ_0 рекомендованной Блазиусом зависимости характеризует уровень достоверности выполненных экспериментальных исследований во всех моделях щелевого тракта.

Влияние режима течения на гидравлическое сопротивление в щелевых каналах с лунками. Испытания экспериментальных моделей показали, что размещение регулярных рельефов из сферических углублений на трактовых поверхностях обуславливает неизбежное увеличение коэффициентов трения λ на поверхности с лунками и гидравлического сопротивления λ_Σ канала в целом независимо от величин геометрических показателей \bar{F}_k , \bar{h} и \bar{H} рельефа по сравнению с аналогичными характеристиками для канала с гладкими стенками. Данные измерений $\lambda = \Phi(\text{Re}_d)$ в моделях с регулярными рельефами сферических углублений на трактовых поверхностях канала показывают следующее:

1. Характер зависимости $\lambda = \Phi(\text{Re}_d)$ коэффициента гидравлического трения λ на трактовой поверхности рельефов из сферических углублений от величины числа Re_d практически не отличается от рассмотренной выше аналогичной зависимости $\lambda_0 = \Phi(\text{Re}_d)$ для гладких трактовых поверхностей.

2. Критическая величина числа Рейнольдса $\text{Re}_d = \text{Re}_{кр}$, превышение которой вызывает переход вида зависимости $\lambda = \Phi(\text{Re}_d)$ от степенного к автомодельному с «квадратичным» законом трения, определяется только сочетанием

величин геометрических показателей \bar{F} , \bar{h} и \bar{H} рельефа, но всегда меньше величины $Re_d = 10^5$, критической для гидравлически гладкой поверхности. Однако критические значения Re_d для всех испытанных моделей с рельефами всегда располагаются на одной линии $Re_{кр}$, которая может быть представлена зависимостью

$$\lambda_{кр} = \lambda_{0,кр} \cdot 10^{10} / Re_{кр}^2,$$

где $\lambda_{0,кр} = 0,018$ — величина коэффициента трения на гидравлически гладкой поверхности в автомодельной области режимов течения при $Re_d > Re_{кр} = 10^5$ (по данным Никурадзе [11] и нашим измерениям).

3. В области переходных режимов течения при $Re_d \leq Re_{кр}$ коэффициент гидравлического трения λ на поверхности всех исследованных регулярных рельефов всегда пропорционален числу Re_d в той же степени $n = -0,25$, что и для гладких поверхностей в законе Блазиуса. Измеренный коэффициент гидравлического трения во всем исследованном диапазоне чисел Re ($2 \cdot 10^4$ — $1,2 \cdot 10^5$) оказался практически независимым от величины Re_d .

4. Во всем исследованном диапазоне Re_d (10^4 — $2 \cdot 10^5$) величины коэффициента гидравлического трения λ на трактовых поверхностях с рельефами всегда превышают аналогичные коэффициенты трения λ_0 в гладкостенных трактах. Степень этого превышения $\Psi_\lambda = \lambda / \lambda_0$ в условиях $Re_d = idem$ (показатель интенсификации трения) зависит только от сочетания величин геометрических показателей рельефа (\bar{F} , \bar{h} , \bar{H} и др.), а зависимости $\lambda = \Phi(Re_d)$ для всех исследованных рельефов (за исключением лунок с $\bar{h} = 1$) располагаются эквидистантно со смещением влево по линии $Re_{кр}$ над их базовой зависимостью $\lambda_0 = \Phi(Re_d)$ для гладких стенок.

Рассмотренные особенности протекания экспериментальных зависимостей $\lambda = \Phi(Re_d)$ указывают на то обстоятельство, что закон трения на трактовых поверхностях

$$\lambda = \Psi_\lambda \lambda_0, \quad (7)$$

с учетом известных законов трения в гидравлически гладких трактах для переходной ($Re_d \leq Re_{кр}$) и автомодельной ($Re_d \geq Re_{кр}$) областей режимов течения потока, а именно

$$\lambda_0 = 0,3164 Re_d^{-0,25} \text{ для } Re_d \leq Re_{кр0} = 10^5, \quad (8)$$

$$\lambda_0 = \lambda_{кр0} = 0,018 \text{ для } Re_d \geq Re_{кр0} = 10^5, \quad (9)$$

можно представить так:

$$\lambda_0 = 0,3164 \Psi_\lambda Re_d^{-0,25} \text{ для } Re_d \leq Re_{кр}, \quad (10)$$

$$\lambda_0 = \lambda_{кр0} = 0,018 \Psi_{\lambda_{кр}} \text{ для } Re_d \geq Re_{кр}. \quad (11)$$

Величина $Re_{кр}$ при фиксированном Ψ_λ определяется выражением

$$Re_{кр} = 10^5 \cdot \Psi_\lambda^{-0,571}. \quad (14)$$

Влияние геометрических параметров на гидравлическое сопротивление щелевых каналов с лунками. Испытания показали, что в отличие от трения в исследованном диапазоне $\bar{H} = 0,33$ — $1,00$ относительная высота щелевого канала не оказывает влияния на уровень коэффициентов трения λ на поверхности рельефов из сферических углублений.

Различное влияние относительной высоты тракта на интенсивность трения и теплообмена поверхностей с регулярными рельефами сферических углублений, обнаруженное в нашей работе, является неожиданным и поэтому требует более детального экспериментального подтверждения в более широком диапазоне изменения величин $\bar{H} = h/\delta$.

Данные всех измерений на рельефах, геометрические показатели которых охватили диапазон $\bar{F} = 0,13$ — $0,67$, $\bar{h} = 0,07$ — $0,28$ и $\bar{H} = 0,3$ — $2,1$ при $\bar{F} = 0$, в пределах допустимого разброса экспериментальных данных подчиняются единой зависимости

$$\Psi_\lambda = 1 + 26(\bar{h} \bar{F})^{1,1}. \quad (15)$$

Сформулированные законы трения (10) и (11) для регулярных рельефов из сферических лунок глубиной $\bar{h} \leq 0,3$ представляются в таком виде:

для переходной области режимов течения ($Re_d \leq Re_{кр}$)

$$\lambda = 0,3164 \left[1 + 26(\bar{h} \bar{F})^{1,1} \right] Re_d^{-0,25}; \quad (16)$$

для автомодельной области режимов течения ($Re_d \geq Re_{кр}$)

$$\lambda = 0,018 \left[1 + 26(\bar{h} \bar{F})^{1,1} \right]^{+1,143}. \quad (17)$$



Критическая величина числа Re_d в трактах из рельефов с лунками глубиной $\bar{h} \leq 0,3$ определяется выражением

$$Re_{кр} = 10^5 \left[1 + 26(\bar{h} \bar{F})^{1,1} \right]^{-0,571}. \quad (18)$$

Результаты исследования влияния двухстороннего облунивания на коэффициенты трения позволяют утверждать, что в диапазоне $\bar{H} \geq 0,33$ удаленность трактовых поверхностей щелевого канала друг от друга не оказывает взаимного влияния на трение, и коэффициент гидравлического трения λ на поверхности регулярных рельефов из сферических углублений остается неизменным независимо от величины \bar{H} .

Результаты опытного исследования теплоотдачи

Установочные опыты. Измеренные в квалификационных испытаниях величины α_0 — базовые для определения эффекта интенсификации теплообмена $\psi_\alpha = \alpha/\alpha_0$ на поверхностях тракта с регулярными рельефами из сферических углублений (в одинаковых условиях по величинам Re_d (Re_x) и H канала).

Их сравнение с аналогичными экспериментальными данными, рекомендуемыми в литературе [11] для расчета теплообмена в гладких щелевых каналах, характеризует уровень достоверности выполненных нами экспериментальных исследований теплообмена на поверхностях с упорядоченными рельефами из сферических углублений.

Влияние режима течения на теплообмен в плоских щелевых каналах с лунками. Результаты измерений показывают, что закон теплообмена на трактовых поверхностях с рельефами из сферических углублений следует искать в виде

$$Nu = \Psi_\alpha Nu_0 \quad (19)$$

и с учетом законов для теплообмена Nu_0 в гладкостенных трактах можно представить так:

$$Nu_x = 2,89 \cdot 10^{-2} \Psi_\alpha Re_x^{0,8} Pr^{0,4} \bar{T}_w^{0,55}, \quad (20)$$

или

$$Nu_d = 2,2 \cdot 10^{-2} \Psi_\alpha Re_d^{0,8} Pr^{0,4} \bar{T}_w^{0,55}, \quad (21)$$

где Ψ_α — коэффициент интенсивности теплообмена, зависящий только от геометрических показателей рельефа сферических углублений и канала (\bar{F} , \bar{H} , $\bar{\Delta}$, СР).

Обобщение опытных данных по теплоотдаче в плоских щелевых каналах с лунками. Обобщить результаты измерений теплообмена на поверхностях всех исследованных рельефов из сферических углублений можно единой зависимостью величины избыточного теплообмена $(\Psi_\alpha - 1)$ от комплекса $[(\bar{F} \bar{\Delta})^{0,8} / \bar{H}^{0,6}]$ геометрических показателей самого рельефа в виде соотношения:

$$\Psi_{St} = 1 + 4,4(\bar{F} \bar{\Delta})^{0,8} / \bar{H}^{0,6}. \quad (22)$$

Обобщение (22) в совокупности с известными данными (19) и (20) для теплообмена в гладкостенных плоских, коаксиальных или круглых каналах позволили сформировать закон теплообмена на поверхности регулярных рельефов из сферических углублений в щелевых трактах в виде

$$Nu_x = 2,89 \cdot 10^{-2} \left[1 + 4,4(\bar{F} \bar{\Delta})^{0,8} / \bar{H}^{0,6} \right] \times \\ \times Re_x^{0,8} Pr^{0,4} \bar{T}_w^{-0,55}; \quad (23)$$

$$Nu_d = 2,2 \cdot 10^{-2} \left[1 + 4,4(\bar{F} \bar{\Delta})^{0,8} / \bar{H}^{0,6} \right] \times \\ \times Re_d^{0,8} Pr^{0,4} \bar{T}_w^{-0,55} \text{ для } x/d \geq 10. \quad (24)$$

Разработаны методики проведения опытов и определения по полученным опытным данным локальных и средних коэффициентов трения и коэффициентов теплоотдачи.

Выбраны диапазоны и шаги варьирования наиболее значимых факторов (переменных), обеспечившие построение эмпирических формул. Проведена оценка метрологических характеристик и выявлены показатели точности экспериментального оборудования и величины погрешностей результатов опытных исследований.

При обработке опытных данных для щелевых каналов прямоугольного поперечного сечения с системами дискретных элементов макрошероховатости в виде небольших углублений со сферической поверхностью (лунки) получены эмпирические соотношения по гидравлическим сопротивлениям, учитывающие влияние как режимных (Re , Pr , \bar{T}), так и геометрических (\bar{h} , F , \bar{H}) параметров течения, а также критерияльные соотношения для средней и локальной (по длине) теплоотдаче на стенках лунок, также с учетом влияния как режимных (Re , Pr , \bar{T}_w), так и геометрических ($\bar{\Delta}$, \bar{F} , \bar{H}) параметров течения.

Предложен способ учета влияния необлуненных стенок каналов на общий коэффициент трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Калинин, Э.К.** Эффективные поверхности теплообмена [Текст] / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, И.З. Копп, А.С. Мякочин. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 408 с.
2. **Гачечипадзе, И.А.** Теплообмен при самоорганизации смерчевых структур / И.А. Гачечипадзе, Г.И. Кикнадзе, Ю.К. Краснов [и др.] // Теплообмен — ММФ. Конвективный, радиационный и комбинированный теплообмен: Проблемные доклады. — Минск, 1988. — С. 83–125.
3. **Афанасьев, В.Н.** Теплообмен и трение на поверхностях, профилированных сферическими углублениями [Текст] / В.Н. Афанасьев, А.И. Леонтьев, Я.П. Чудновский // Препр. МГТУ. — № 1–90 — М.: Изд-во МГТУ, 1990. — 118 с.
4. **Кикнадзе, Г.И.** Интенсификация тепло- и массообмена / Г.И. Кикнадзе, Ю.К. Краснов, Ю.В. Чушкин [и др.]. — М.: ЦНИИатоминформ, 1987. — 57 с.
5. **Леонтьев, А.И.** Существо механизма интенсификации теплообмена на поверхностях со сферическими выемками [Текст] / А.И. Леонтьев, В.В. Олимпиев, Е.В. Дилевская, С.А. Исаев // Известия РАН. Энергетика. — 2002. — № 2. — С. 117–135.
6. **Щукин, А.В.** Интенсификация теплообмена сферическими выемками при воздействии возмущающих факторов [Текст] / А.В. Щукин, А.П. Козлов [и др.]; Под ред. акад. В.Е. Алемасова. — Казань: Изд.-во КГТУ, 2003. — 143 с.
7. **Исаев, С.А.** Численное исследование механизма вихревой интенсификации теплообменных процессов в окрестности поверхности с лункой [Текст] / С.А. Исаев, А.И. Леонтьев, А.Е. Усачов / ИФЖ. — 1998. — Т. 71. № 3. — С. 484–488.
8. **Gotovskiy, M.** Heat transfer enhancement by artificial roughness at Reynolds numbers related with laminar and transitional regimes for high-viscous liquids [Текст] / M. Gotovskiy, S. Isaev // Proc. of the 14th Intern. Heat Transfer Conference (IHTC14). — August 8–13, 2010. — Washington, DC, USA
9. **Парфенов, В.П.** Теплоотдача и гидравлическое сопротивление в каналах гофрированных насадок с шероховатой поверхностью [Текст] / В.П. Парфенов, И.В. Белокрылов // Теплоэнергетика. — 1992. — № 8. — С. 72–75.
10. **Галкин, М.Н.** Метод определения внутренних граничных условий теплообмена в охлаждаемых лопатках газовых турбин [Текст] / М.Н. Галкин, А.Н. Бойко, А.А. Харин // Изв. вузов. Машиностроение. — 1978. № 8. — С. 77–82.
11. **Сукомел, А.С.** Теплообмен и трение при турбулентном течении газа в коротких каналах [Текст] / А.С. Сукомел, В.И. Величко, Ю.Г. Абросимов. — М.: Энергия, 1970. — 216 с.

УДК 539.374:519.8

Э.М. Нусратуллин

УПРОЧНЕНИЕ ХВОСТОВИКА ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА ЗА СЧЕТ АРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОМОДУЛЬНЫМИ ВОЛОКНАМИ

Лопатки компрессоров газотурбинных авиационных двигателей работают в сложных температурно-силовых условиях и относятся к числу наиболее ответственных деталей. Один из способов соединения компрессорной лопатки с диском — соединение типа «ласточкин хвост». При таком соединении в местах перехода от пера лопатки к ее хвостовой части имеет место значительное местное увеличение напряжения (концентрация напряжений) [1], в ряде случаев приводящее к разрушению лопатки. В связи с этим для обеспечения прочности лопатки в месте соединения ее пера с хвостовиком переходы выполняют поверхностями максимально возможного радиуса и при изготовлении эти поверхности тщательно полируют.

В статье в качестве модели тела хвостовика при армировании используется модель ортотропного материала с переменными по объему хвостовика свойствами.

В работе предлагается для снижения концентрации напряжений в переходных областях использовать армирование материала лопатки высокомодульными высокопрочными волокнами. При этом решается задача первого приближения, в которой принимается модель абсолютно жесткого паза диска, что может привести к некоторому искажению полей напряжений и деформаций по сравнению с действительными, но позволяет отразить качественное влияние армирования на поля напряжений.

Для анализа напряженно-деформированного состояния лопатки разработана методика, позволяющая выполнять расчеты при произвольных направлениях укладки армирующих волокон и коэффициентах армирования композиционного материала лопатки, изменяющихся по объему тела.

При реализации методики решены следующие основные задачи:

разработана методика расчета с помощью пакета ANSYS эффективных коэффициентов упругости композиционного материала на основе магния, армированного углеродными и борными волокнами;

сформирована твердотельная модель корневой части композиционной компрессорной лопатки при меняющихся по ее объему коэффициенте армирования и углах ориентации армирующих волокон;

выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния модели корневой части лопатки для трех вариантов ее изготовления — из однородного изотропного материала и при двух видах армирования;

проведен анализ результатов расчетов и сформированы рекомендации по выбору схемы армирования, позволяющие существенно снизить концентрацию напряжений в корневой части лопатки.

Для снижения веса и повышения прочности лопаток авиационных двигателей применяются композиционные материалы, армирующие компоненты которых имеют высокий предел прочности и высокий модуль упругости. Такими свойствами обладают углеродные и борные волокна [2, 3]. Борное волокно [3] имеет больший диаметр и достаточно хорошо работает на сжатие, а углеродное волокно [2] имеет малый диаметр, но обладает меньшей плотностью и хорошо работает на растяжение.

При расчете напряженно-деформированного состояния конструкций из композиционных материалов необходимо знать их упругие характеристики. Ввиду многообразия возможных схем армирования такие характеристики невозможно

определить экспериментально для всех вариантов. Поэтому необходимо математическое моделирование на компьютере упругих свойств композитов для различных схем армирования.

Существующие инженерные формулы определения характеристик композитов [4] базируются на весьма приближенных допущениях о форме и расположении армирующих волокон в композите и поэтому во многих случаях не обеспечивают достаточную точность расчетов.

В связи с этим для более точного учета степени армирования и ориентации армирующих волокон при расчете эффективных упругих характеристиках композиционного материала использовался метод конечных элементов, реализованный в известном программном продукте ANSYS [5].

Используя пакет ANSYS применительно ко всем точкам тела, можно формировать модели ортотропных однородных материалов, эквивалентных неоднородным композиционным материалам. Для данных эквивалентных ортотропных материалов справедлив обобщенный закон Гука

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E_x} \sigma_x - \frac{\nu_{xy}}{E_y} \sigma_y - \frac{\nu_{xz}}{E_z} \sigma_z; \\ \varepsilon_y &= -\frac{\nu_{yx}}{E_x} \sigma_x + \frac{1}{E_y} \sigma_y - \frac{\nu_{yz}}{E_z} \sigma_z; \\ \varepsilon_z &= -\frac{\nu_{zx}}{E_x} \sigma_x - \frac{\nu_{zy}}{E_y} \sigma_y + \frac{1}{E_z} \sigma_z; \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{G_{xy}} \tau_{xy}; \quad \gamma_{yz} = \frac{1}{G_{yz}} \tau_{yz}; \quad \gamma_{zx} = \frac{1}{G_{zx}} \tau_{zx} \end{aligned} \right.$$

и становятся известными модули продольной упругости E_x, E_y, E_z , коэффициенты Пуассона $\nu_{xy}, \nu_{yx}, \nu_{xz}, \nu_{zx}$, модули сдвига G_{xy}, G_{yz}, G_{zx} во всех точках тела [2].

Для получения наибольшей прочности было решено зоны лопатки, работающие на растяжение, армировать углеродными волокнами, а зоны, работающие в основном на сжатие, — борными. В итоге тело, выбранное в качестве модели хвостовика лопатки, имеет углеродные волокна, направленные вдоль оси Y , совпадающей с осью пера лопатки, а борные волокна направлены по оси X в области между линиями $y=3$ и $y=9$ мм (рис. 1).

При выбранной схеме армирования (см. рис. 1) имеются также зоны, занимаемые только матричным сплавом МЛ-10.

Расчет хвостовой части лопатки выполнялся в рамках плоского напряженного состояния методом конечных элементов на вычислительном программном комплексе ANSYS [3].

При расчетах моделировалось реальное закрепление лопаток, при котором отсутствовали перемещения точек тела перпендикулярно боковым граням B_1B_3 и C_1C_3 , а в направлении этих граней точки тела имели свободное перемещение без трения (см. рис. 1), так как учет трения — это задача второго приближения, требующая специального исследования.

Для верхней грани тела B_3C_3 задавалось ее перемещение Δ вдоль оси Y , при котором на грани B_3C_3 имело место среднее напряжение $\sigma_y^{\text{cp}} = 100$ МПа.

Результаты трех вариантов расчетов в виде эпюр напряжений показаны на рис. 2–4. При этом ввиду симметрии тела и симметрии действующей внешней нагрузки на этих рисунках показаны только половины рассматриваемых фигур.

В первом расчете рассматривался хвостовик, изготовленный из магниевого сплава МЛ-10 без армирования. Результаты расчетов представлены в форме эпюр напряжений по контуру сечения на рис. 2.

Видно, что в угловых точках C_1, C_3 и C_4 (рис. 1, 2) имеет место сильная концентрация напряжений, а максимальное значение сжимающего напряжения в точке C_3 достигает величины $\sigma_{\text{max}} = -488$ МПа (см. рис. 2).

При втором расчете рассматривался хвостовик, изготовленный из магниевого сплава МЛ-10 и армированный углеродными волокнами, направленными вдоль оси Y (рис. 3). Коэффициент армирования $\psi_c = 0,3$. Эпюры напряжений по контуру сечения показаны на рис. 3. Видно, что такое армирование снизило напряжение в наиболее опасной точке C_3 (сравн. рис. 1, 3) до величины $\sigma_{\text{max}} = -457$ МПа, т. е. результат мало отличается от того, что было в неармированной лопатке (см. рис. 2). Но при армировании углеродными волокнами мы существенно повышаем прочность армированных зон, а следовательно, и прочность всей лопатки.

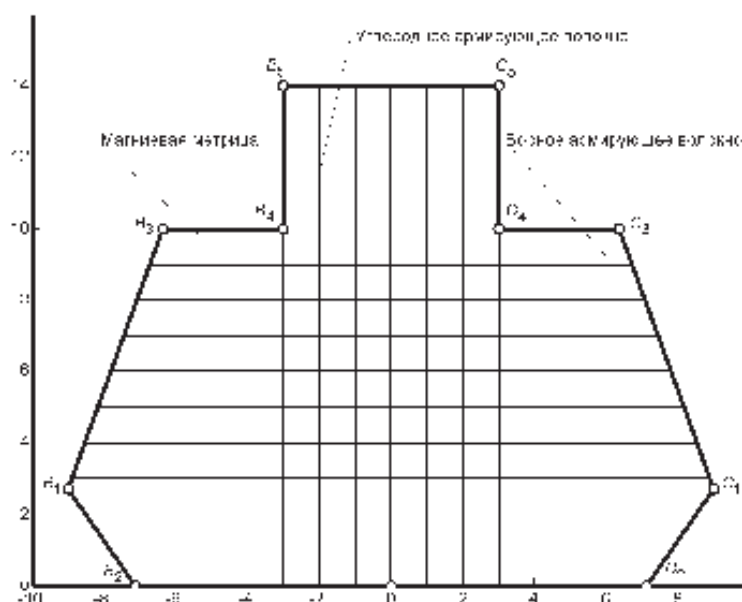


Рис. 1. Сечение корневой части лопатки и направление укладки армирующих волокон композиционного материала

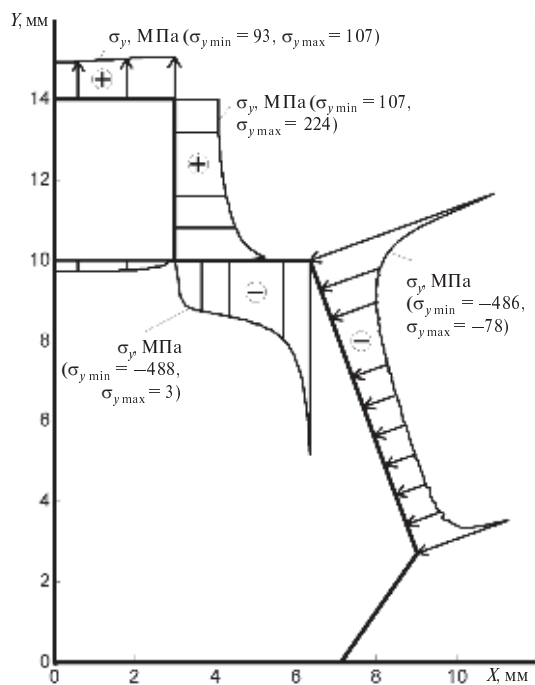


Рис. 2. Эпюры напряжений по поверхности изотропного тела из магниевого сплава МЛ-10 ($\sigma_{\text{пл}} = 245$ МПа)

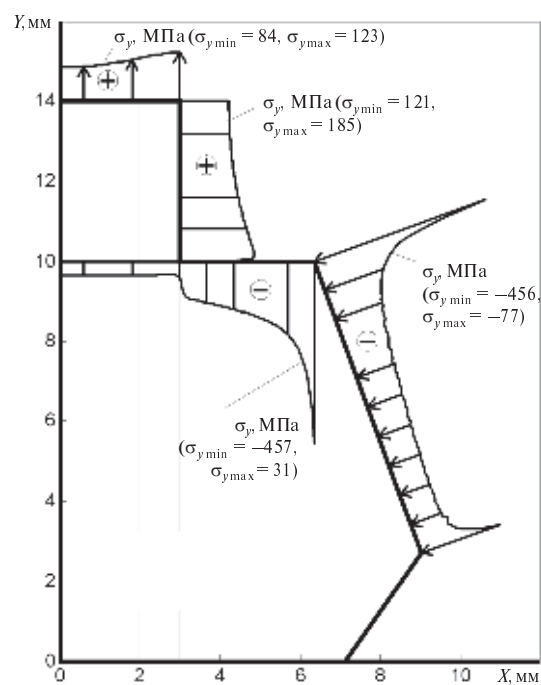


Рис. 3. Эпюры напряжений по контуру тела из магниевого сплава МЛ-10, армированного углеродными волокнами при $\psi_C = 0,3$

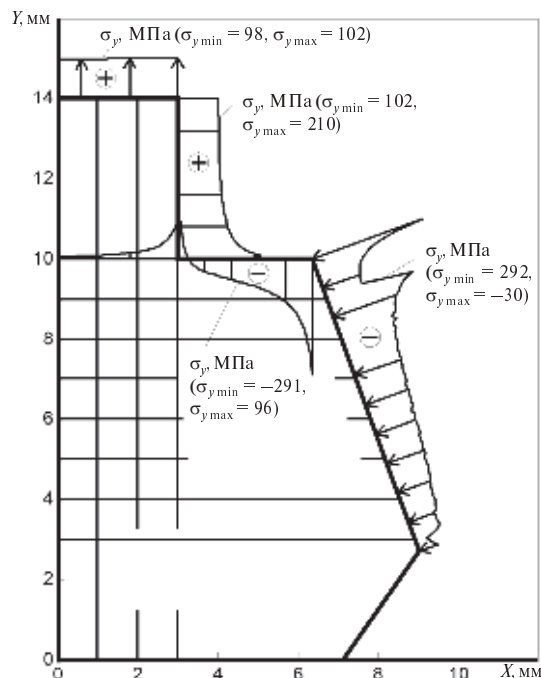


Рис. 4. Эпюры напряжений для тела из магниевого сплава МЛ-10, армированного углеродными и борными волокнами соответственно при $\psi_C = 0,3$, $\psi_B = 0,3$

На участке B_3C_3 при армировании углеродными волокнами, направленными вдоль оси Y , модуль сдвига практически не меняется по сравнению с чистым магнием, и поэтому нагрузка от волокон, более близких к оси Y , в меньшей степени передается на боковые грани хвостовика по сравнению с волокнами, более удаленными от оси Y . Это приводит к снижению напряжений в зонах, более близких к оси Y .

В третьем расчете рассматривался хвостовик, изготовленный из магниевого сплава МЛ-10, армированного углеродными волокнами с коэффициентом армирования $\psi_C = 0,3$ и борными волокнами с коэффициентом армирования $\psi_B = 0,3$. Эпюры напряжений показаны на рис.4.

При этом (см. рис. 4) удалось снизить напряжение в наиболее опасной точке C_3 до величины $\sigma_{y \max} = -292$ МПа, что в $488/292 = 1,66$ раз меньше, чем было в неармированной лопатке.

В зоне, примыкающей к точке C_3 , на участке при $y = 9-10$ мм расположен чистый магний, а при $y < 9$ мм — армированный материал. На общей границе этих зон при $y = 9$ мм деформации равные, модули упругости разные, что приводит к скачку напряжений.

Анализ рис. 2–4 показывает, что площади эпюр равны, но при армировании борными волокнами в средней части нормальные напряжения увеличились, т. е. нам удалось перераспределить напряжения на боковые части замка.

Снизив напряжения в угловых точках, где материалом является магний, мы существенно повышаем коэффициент запаса прочности (в $456/291 = 1,56$ раз).

Таким образом, одновременное армирование углеродными и борными волокнами — наилучший вариант, при котором существенно снижается максимальное напряжение и повышается прочность лопатки.

Результаты работы сводятся к следующему:

Разработана методика расчета напряжений в корневой части лопатки компрессора авиационного двигателя, армированной борными и углеродными волокнами.

Проведены расчеты напряженно-деформированного состояния для модели корневой части лопатки в форме «ласточкин хвост» при различных схемах армирования. Показано, что схема армирования и объемная доля армирующих волокон оказывают сильное влияние на напряжения в зонах концентрации напряжений.

Рекомендовано для повышения прочности лопатки армировать зоны растяжения углеродными волокнами, направленными вдоль оси пера лопатки, а зоны сжатия в корневой части лопатки — более жесткими борными волокнами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мавлютов, Р.Р. Концентрация напряжений в элементах авиационных конструкций [Текст] / Р.Р. Мавлютов. — М.: Наука, 1981. — 141 с.
2. Костиков, В.И. Сверхвысокотемпературные композиционные материалы [Текст] / В.И. Костиков, А.Н. Варенков. — М.: Интермет Инжиниринг, 2003. — 560 с.
3. Портной, К.И. Структура и свойства композиционных материалов [Текст] / К.И. Портной, С.А. Са-

либеков, И.Л. Светлов, В.М. Чубаров. — М.: Машиностроение, 1979. — 255 с.

4. Первушин, Ю.С. Проектирование и прогнозирование механических свойств однонаправленного слоя из композиционного материала [Текст] / Ю.С. Первушин, В.С. Жернаков. — Уфа, 2002. — 127 с.

5. Чигарев, А.В. ANSYS для инженеров [Текст]: справочное пособие / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. — М.: Машиностроение, 2004. — 512 с.



СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДИЗЕЛЕЙ С ГАЗОТУРБИННЫМ И МЕХАНИЧЕСКИМ НАДДУВОМ

Наполнение рабочих полостей поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) рабочим телом под давлением, или наддув, является существенным фактором повышения их мощности.

И если при этом применительно к бензиновым ДВС имеют место ограничения, обусловленные детонацией горючей смеси, то возможности наддува для дизелей не только велики, но и позволяют получить весьма значительный положительный эффект.

Так, к примеру, судовой дизель Д12 (12Ч 15/18)* без наддува при оборотах коленчатого вала $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ и мощности $N_e = 386 \text{ кВт}$ имеет среднее эффективное давление теплового цикла $p_e = 0,61 \text{ МПа}$ и удельный расход топлива $g_e = 232 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$, а дизель транспортного назначения МТУ (12ЧН 14,4/14) с газотурбинным наддувом при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ и $N_e = 1200 \text{ кВт}$ — $p_e = 1,75 \text{ МПа}$ и $g_e = 209 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ [1]. Даже с учетом разницы в оборотах коленчатых валов этих двигателей мощность, приходящаяся на единицу рабочего объема цилиндров, во втором случае оказывается почти вдвое большей, а удельный расход топлива — примерно на 10 % меньшим.

Применительно к судовым дизелям известны примеры и с $p_e = 2,4 \text{ МПа}$, что вчетверо превосходит обычное для этого типа двигателей без наддува значение $p_e = 0,6 \text{ МПа}$.

Как средство наддува преимущество имеют наиболее работоспособные и компактные центробежные нагнетатели (компрессоры), используемые в трех вариантах способов наддува — газотурбинном (ГТН), механическом (МН) и комбинированном (КН).

В первом случае агрегаты наддува конструктивно объединяются с газовыми турбинами, использующими даровую энергию выпускных газов самих же форсируемых двигателей, во втором — приводятся механически через мульти-

пликатор (ускорительная передача) непосредственно от коленчатых валов двигателей. Третий способ — комбинация первых двух.

В плане повышения мощности и экономичности двигателей из первых двух способов наддува более эффективен первый, поскольку в данном случае от двигателей не отнимается энергия на привод компрессора.

Однако динамические свойства двигателей с ГТН несколько ухудшаются по причине инерционности вращающихся элементов (роторов) систем турбонаддува и «непропорционального» изменения их производительности при изменении режима работы двигателей (ухудшается так называемая «приемистость», оцениваемая временем перехода на иной режим работы, и «коэффициент приспособляемости» как отношение максимального крутящего момента к номинальному его значению при работе двигателя по внешней характеристике).

Третий вариант наддува в принципе наиболее совершенен, поскольку он не только улучшает приемистость, способствует росту коэффициента приспособляемости, но и позволяет передавать потребителям энергии через механическую передачу избыток мощности газовых турбин, реально имеющий место на предельных и близким к ним режимах работы двигателей. Однако подобный вариант по сравнению с ГТН конструктивно значительно более сложен, как, впрочем, и вариант механического наддува.

Кстати говоря, комбинированный наддув только и возможен для двухтактных двигателей, у которых теплосодержание выпускных газов, разбавляемых продувочным воздухом, снижается и оказывается недостаточным для привода турбокомпрессора.

В связи с различием условий работы двигателей, прежде всего с двумя наиболее используемыми системами наддува — ГТН и МН, естественно возникает необходимость в сравнительной оценке их общей эффективности с учетом перспективных тенденций высоких степеней наддува.

* 12-ти цилиндровый четырехтактный дизель с диаметром цилиндров 150 мм и ходом поршней 180 мм.

При прочих равных условиях мощность двигателей более или менее пропорциональна росту давления p_k наддува, однако при наддуве именно в дизелях для лучшего перемешивания увеличиваемых цикловых подач топлива с воздухом необходимо повышение коэффициента α избытка воздуха при сгорании топлива, в связи с чем относительная мощность форсированных двигателей уменьшается по мере роста избытка воздуха.

В то же время при наддуве именно дизелей надлежит уменьшать степень сжатия ε (отношение полного объема V_a цилиндров к объему V_c их камер сгорания) во избежание недопустимого роста максимального давления сгорания p_z .

Последнее обстоятельство, в принципе снижающее индикаторный (η_i) и, естественно, и эффективный (η_e) КПД двигателей, при наддуве компенсируется ростом теплосодержания при сжатии рабочего тела в компрессоре, в связи с чем истинная степень сжатия ε^H «комбинированного» двигателя выражается произведением исходной степени сжатия ε и повышения степени давления в компрессоре $\pi_k = p_k / p_0$ (p_0 — внешнее давление): $\varepsilon^H = \varepsilon \pi_k$.

При этом индикаторный КПД η_i форсированных двигателей практически остается неизменным, а при сравнительно мало изменяющихся в зависимости от степени форсирования механических потерях имеющее место при ГТН снижение удельного расхода топлива связано с повышением механического КПД η_m^H двигателей, поскольку доля механических потерь $N_{мп}$ в растущей эффективной мощности N_e^H двига-

телей убывает: при ГТН $\eta_m^H = \frac{N_e^H}{N_{iГТН}^H} =$

$$= \frac{N_e^H}{N_e^H + N_{мп}} \quad (N_{iГТН}^H = \frac{N_e^H}{\eta_m^H} - \text{индикаторная мощность});$$

в то же время при отсутствии наддува $\eta_m = \frac{N_e}{N_e + N_{мп}}$, откуда $N_{мп} = N_e \frac{1 - \eta_m}{\eta_m}$

$$\text{и } \eta_m^H = \frac{N_e^H}{N_e^H + N_e \frac{1 - \eta_m}{\eta_m}}.$$

В силу сказанного мощность форсируемых двигателей соотносительно к мощности двигателей без наддува:

$$N_{eГТН}^H = N_e \frac{\alpha}{\alpha^H} \frac{\eta_m^H}{\eta_m} \frac{p_k}{p_0},$$

или

$$N_{eГТН}^H = \frac{N_e}{\eta_m} \frac{\alpha}{\alpha^H} \frac{N_{eГТН}^H}{N_{eГТН}^H + N_e \frac{1 - \eta_m}{\eta_m}} \frac{p_k}{p_0}.$$

После сокращения на $N_{eГТН}^H$ и очевидных преобразований получаем

$$N_{eГТН}^H = \frac{N_e}{\eta_m} \left(\frac{\alpha}{\alpha^H} \frac{p_k}{p_0} + \eta_m - 1 \right).$$

Полагая, что значение p_k соответствует давлению непосредственно в цилиндрах в начале процесса сжатия, которое для двигателей без наддува отличается от внешнего и составляет p_a , окончательно имеем

$$N_{eГТН}^H = \frac{N_e}{\eta_m} \left(\frac{\alpha}{\alpha^H} \frac{p_k}{p_a} + \eta_m - 1 \right).$$

При неизменных индикаторных КПД η_i , а следовательно, при неизменных у форсированных дизелей их удельных индикаторных расходах топлива g_i , и очевидном условии, что вообще удельный эффективный расход $g_e = g_i / \eta_m$, в случае ГТН имеет $g_{eГТН}^H = g_e \eta_m / \eta_m^H$.

$$\text{Эффективный КПД } \eta_{eГТН}^H = 3600 / Q_T^H g_{eГТН}^H,$$

где $Q_T^H = 42000$ кДж/кг — низшая теплотворная способность дизельного топлива.

Среднее эффективное давление $p_{eГТН}^H$ теплового цикла двигателей с ГТН:

$$p_{eГТН}^H = p_e N_{eГТН}^H / N_e.$$

Применительно к механическому наддуву затрачиваемая на привод компрессора мощность определяется по выражению $N_k^H = G_b^H L_{к ал}^H / \eta_k^H$ кВт,

$$\text{в котором } G_b^H = \frac{N_{eГТН}^H \alpha^H \varphi^H L_0}{1000 \cdot 3600} \text{ кг/с — полный}$$

расход двигателем воздуха; $L_{\text{к ад}}^{\text{H}} = \frac{k}{k-1} R_{\text{в}} T_0 \times$
 $\times \left[\left(\frac{p_{\text{к}}^{\text{H}}}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$ кДж/кг — адиабатическая рабо-

та сжатия воздуха в компрессоре; φ^{H} — коэффициент продувки, обусловленный транзитным протеканием воздуха через цилиндры в момент одновременного открытия всасывающих и выпускных клапанов в конце процесса выпуска (вообще $\varphi = 1,05-1,20$); L_0 — теоретически необходимое для сгорания единицы массы топлива количество воздуха (для дизельного топлива $L_0 = 14,3$ кг воздуха/кг топлива); $k = 1,6$ — показатель адиабаты сжатия воздуха в центробежном компрессоре; $R_{\text{в}} = 0,287$ кДж/кг·град — газовая постоянная воздуха; $T_0 = 273+15 = 288$ К — начальная температура воздуха на входе в компрессор; $p_0 = 0,098$ МПа — внешнее давление.

Полный КПД компрессора $\eta_{\text{к}}^{\text{H}} = \eta_{\text{к ад}} \eta_{\text{к мех}}$,

где $\eta_{\text{к мех}} = 0,98$; адиабатический КПД $\eta_{\text{к ад}}$ определяется после выбора типоразмера турбокомпрессора [2] по данным $G_{\text{в}}$ и $\pi_{\text{к}}$ (ГОСТ 9658—81) — до отношения $\pi_{\text{к}}^{\text{H}} < 3,6$, при превышении которого КПД одноступенчатого компрессора несколько уменьшается.

Реальная мощность дизеля с механическим наддувом, естественно, определяется его общей

мощностью $N_{\text{е ГТН}}^{\text{H}}$ за вычетом мощности компрессора:

$$N_{\text{е МН}}^{\text{H}} = N_{\text{е ГТН}}^{\text{H}} - N_{\text{к}}^{\text{H}}.$$

Эффективные удельный расход топлива и КПД дизеля с механическим наддувом:

$$g_{\text{е МН}}^{\text{H}} = g_{\text{е ГТН}}^{\text{H}} N_{\text{е МН}}^{\text{H}} / N_{\text{е ГТН}}^{\text{H}};$$

$$\eta_{\text{е МН}}^{\text{H}} = 3600 / Q_{\text{Т}}^{\text{H}} g_{\text{е МН}}^{\text{H}}.$$

Для проведения сравнительных расчетов примем характерные для дизелей транспортно-го назначения без наддува параметры. В частности, для дизеля типа ЯМЗ-236 с неразделенными камерами сгорания [1] и эффективной мощностью $N_{\text{е}} = 100$ кВт при $n = 2100$ мин⁻¹ (реально для дизеля ЯМЗ-236 $N_{\text{е}} = 132,4$ кВт) приняты $g_{\text{е}} = 230$ г/кВт·ч; $p_{\text{е}} = 0,68$ МПа; $p_{\text{а}} = 0,085$ МПа; $\eta_{\text{е}} = 0,373$; $\alpha = 1,5$, $\eta_{\text{м}} = 0,82$.

Результаты расчетов по рассмотренным выше показателям для заданных $p_{\text{к}}$ и α^{H} представлены в таблице, а характерные соотношения основных эксплуатационных показателей дизелей с газотурбинным и механическим наддувом,

таких, как $\Delta = \frac{N_{\text{е ГТН}}^{\text{H}}}{N_{\text{е МН}}^{\text{H}}}$ и $\delta = \frac{g_{\text{е ГТН}}^{\text{H}}}{g_{\text{е МН}}^{\text{H}}}$ и эффектив-

ные КПД $\eta_{\text{е ГТН}}^{\text{H}}$ и $\eta_{\text{е МН}}^{\text{H}}$, — в графическом виде на рис. 1 и 2.

Строго говоря, результаты расчетов в определенной степени являются ориентировочными,

**Сравнение расчетных показателей для дизелей
с газотурбинным и механическим наддувом**

Вид наддува	Показатели и единицы измерения	При $p_{\text{а}} = 0,085$, МПа	Значения показателей при давлении наддува $p_{\text{к}}$, МПа			
			0,2	0,3	0,4	0,5
Газо- турбинный наддув	$N_{\text{е ГТН}}^{\text{H}}$, кВт	$N_{\text{е}} = 100$	247,1	362,9	461,9	544,4
	$p_{\text{е ГТН}}^{\text{H}}$, Мпа	$p_{\text{е}} = 0,68$	1,68	2,47	3,14	3,70
	α^{H}	$\alpha_0 = 1,5$	1,6	1,7	1,8	1,9
	$\eta_{\text{м ГТН}}^{\text{H}}$	$\eta_{\text{м}} = 0,820$	0,918	0,943	0,952	0,961
	$g_{\text{е ГТН}}^{\text{H}}$, г/кВ · ч	$g_{\text{е}} = 230$	205,4	200,0	197,5	196,3
	$\eta_{\text{е ГТН}}^{\text{H}} = 3600 / (Q_{\text{Т}}^{\text{H}} n_{\text{е}}^{\text{H}})$	$\eta_{\text{е}} = 0,373$	0,417	0,429	0,434	0,436

Окончание табл.

Вид наддува	Показатели и единицы измерения	При $p_a = 0,085$, МПа	Значения показателей при давлении наддува p_k , МПа			
			0,2	0,3	0,4	0,5
Механический наддув	φ^H	$\varphi = 1$	1,08	1,10	1,12	1,14
	G_B^H , кг/с	$G_B = 0,137$	0,348	0,538	0,731	0,915
	$\pi_k = p_k / p_0$	—	2,04	3,06	4,08	5,10
	$\eta_{k ад}$ (ГОСТ 9658-81)	—	0,68	0,70	0,70	0,68
	$\eta_k^H = \eta_{k ад} \eta_{k мех}$	—	0,67	0,69	0,69	0,67
	$L_{k ад}^H$, кДж/кг, ($k=1,6$)	—	67,64	114,99	153,23	185,87
	$N_k^H = G_B^H L_{k ад}^H / \eta_k^H$, кВт	—	35,13	89,66	162,33	253,84
	$N_{e МН}^H$, кВт	$N_e = 100$	211,97	272,64	299,57	290,56
	$p_{e МН}^H$, МПа	$p_e = 0,68$	1,44	1,85	2,04	1,98
	$g_{e МН}^H = g_{e ГТН}^H N_{e МН}^H / N_{e ГТН}^H$	$g_e = 230 =$	239,4	265,7	304,5	367,8
Итог	$\eta_{e МН}^H$	$\eta_e = 0,373$	0,368	0,325	0,281	0,233
	$\Delta = N_{e ГТН}^H / N_{e МН}^H$	1	1,17	1,33	1,54	1,87
	$\delta = g_{e ГТН}^H / g_{e МН}^H$	1	0,86	0,75	0,65	0,53

поскольку показатели работы двигателей в каждом конкретном случае зависят от условий доводки их теплового процесса (в частности, для обеспечения должного моторесурса форсированных ДВС иной раз несколько снижают исходное число оборотов коленчатого вала, особо подбирают оптимальное значение коэффициента

избытка воздуха при сгорании топлива и многое другое).

Тем не менее представленные зависимости дают достаточно четкое представление о тенденциях изменения и возможных соотношениях основных рабочих показателей дизелей с ГТН и МН.

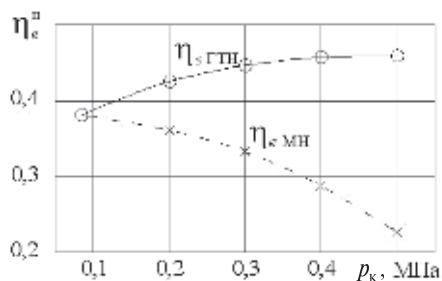


Рис. 1. Эффективный КПД теплового цикла дизелей с газотурбинным и механическим наддувом — $\eta_{e ГТН}^H$ и $\eta_{e МН}^H$

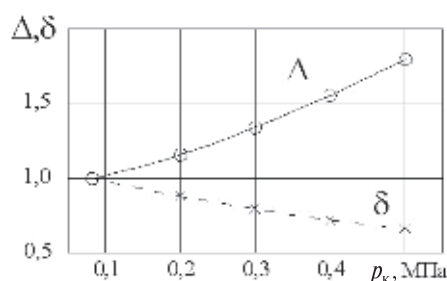


Рис. 2. Соотношение мощностей $\Delta = N_{e ГТН}^H / N_{e МН}^H$ и эффективного удельного расхода топлива $\delta = g_{e ГТН}^H / g_{e МН}^H$ дизелей с газотурбинным и механическим наддувом



По результатам расчетов стало очевидно, что вынужденное увеличение коэффициента избытка воздуха при сгорании топлива в случае ГТН в значительной степени компенсируется увеличением механического КПД двигателей; по мере увеличения степени наддува мощность дизеля с ГТН прогрессивно возрастает, а удельный расход топлива уменьшается.

В то же время при МН прогрессивно возрастают потери энергии на привод компрессора, в связи с чем мощности и экономичности дизелей с ГТН и МН все более разнятся (см. рис. 1 и 2). И если в пределах рассмотренных степеней наддува для ГТН нет каких-либо ограничений, то для МН таковые имеют место прежде всего по экономичности.

Пределом возможного практического использования МН представляется давление наддува не более 0,20–0,25 МПа, да и то для случаев особой необходимости обеспечения повышенных требований к тяговым характеристикам дизелей.

Так, уже при $p_k = 0,2$ МПа мощность дизеля с МН составляет примерно 86 % от мощности дизеля с ГТН ($\Delta = 1,17$), а удельный расход топлива на 16–18 % выше ($\delta = 0,86$).

Для $p_k = 0,3$ МПа дизель с МН теряет почти 90 кВт, или 1/4 от мощности дизеля с ГТН, а по расходу топлива — 65,7 г/кВт·ч, или в соотносительном плане 1/3, а механический наддув при p_k свыше 0,4 МПа исключается в принципе, поскольку при этом среднее эффективное давление теплового цикла p_k даже падает, равно как и мощность дизеля.

При $p_k = 0,5$ МПа «потерянная» мощность при МН на привод компрессора составляет около 254 кВт, а «излишний» расход топлива — 171,3 г/кВт·ч, который почти равен общему расходу топлива дизеля с ГТН мощностью 544,4 кВт ($g_e = 196,3$ г/кВт·ч).

Несомненные преимущества ГТН по мощности и экономичности приводят к необходимости поиска путей локализации его недостатков

в части тяговых свойств ДВС, особенно транспортного назначения, работающих в широком диапазоне нагрузок и чисел оборотов.

Результаты аналитического исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Эффективное применение механического наддува возможно до значений давления наддува 0,20–0,25 МПа.

2. Для дальнейшего форсирования дизеля без снижения моторесурса целесообразно применять газотурбинный наддув, что потребует преодоления его традиционных недостатков, в частности — относительно низких динамических свойств дизеля.

3. Перспективными мерами по улучшению динамических свойств дизелей с ГТН являются:

уменьшение массы ротора турбокомпрессора (ТК) и использование числа ТК сообразно числу цилиндровых блоков дизелей, поскольку при этом суммарная инерционная масса роторов ТК будет существенно меньшей, чем масса ротора единичного компрессора;

проведение расчета проточной части ТК для режима максимального крутящего момента ДВС [2];

частичный перепуск выпускных газов в зоне более высоких нагрузок двигателя помимо ТК с целью введения последнего в режим максимального КПД на пике крутящего момента ДВС при его работе по внешней характеристике;

применение регулируемых ТК (поворотные лопатки входного направляющего аппарата и лопаточного диффузора компрессора, поворотные сопловые лопатки газовой турбины);

при давлении наддува на номинальном режиме работы дизелей выше $p_k = 0,18$ –0,19 МПа, когда импульсный наддув уже не дает дополнительного повышения мощности газовой турбины за счет использования импульсной энергии выпускных газов ДВС [2], — использование импульсного наддува на режиме максимального крутящего момента, при котором p_k меньше его номинального значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Русинов, Р.В. Двигатели автомобилей и тракторов [Текст] / Р.В. Русинов, Р.Ю. Добрецов. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2010. — С. 16–18, 23, 24, 28.

2. Русинов, Р.В. Агрегаты наддува двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Р.В. Русинов. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006. — С. 35–41, 92–99.

УДК 621.865

А.В. Борисевич, П.Ю. Гедько, А.Б. Смирнов

МИКРОРОБОТ НА БАЗЕ СФЕРИЧЕСКОГО ШАРНИРА С ПЬЕЗОПРИВОДОМ

С момента открытия прямого и обратного пьезоэффекта в 1880 году прошло уже больше века. За это время пьезокерамика успела занять крепкие позиции в различных сферах использования — от космической промышленности до любительской фототехники и зажигалок. Пьезоэлектрический привод используется в приборостроении, робототехнике, микромеханике, медицине. Его компактность и быстродействие позволили вытеснить классические электромеханические приводные механизмы во многих областях техники.

В данной статье рассматривается микроробот с приводом на основе пьезокерамических актюаторов. Разработка и исследование таких систем — актуальная задача, так как во многих отраслях промышленности нужны системы точного позиционирования миниатюрных предметов или инструмента, от них требуется высокая надежность, точность и простота конструкции. Многие заказчики выдвигают жесткие требования по компоновке, быстродействию и энергопотреблению.

Существуют различные решения данной проблемы. Но использование классических схем все чаще становится либо слишком дорогостоящим, либо вообще невозможным. Поэтому сейчас в микророботостроении стараются применять нестандартные решения, использовать современные типы приводов, различные физические эффекты.

Пьезокерамика зарекомендовала себя как надежный и экономичный тип преобразователя электрической энергии в механическую. Разнообразные формы исполнения пьезокерамических элементов позволяют упростить их использование в микромашинах.

Исходя из требований технологических процессов, использующих микророботы при сборке микроизделий, а также при работе с биологическими микрообъектами, была выбрана конструктивная схема микроробота, работающего в сферической системе координат. Поэтому

в качестве его основного элемента был выбран сферический шарнир, позволяющий осуществлять перемещение рабочего органа по трем угловым координатам.

Принципы работы микроробота с параллельной кинематикой

Микророботы с пьезоприводами можно разделить на две основные группы — с последовательной и параллельной кинематикой. В первом случае все звенья соединены последовательно, причем каждое обеспечивает только одну степень подвижности. Во втором случае звенья могут обеспечивать две и более степеней подвижности. В микророботах применяют в основном два типа пьезоактюаторов: биморфные (работающие на изгиб) и стержневые (работающие на растяжение — сжатие), состоящие из набора последовательно соединенных пьезоэлементов. Микророботы отличаются также по способу передачи движения от пьезоактюатора на рабочее звено: либо за счет деформации самого пьезоактюатора, либо с использованием силы трения за счет проскальзывания рабочего звена относительно толкателя пьезоактюатора. Во втором случае перемещение выходного звена на несколько порядков выше, чем в первом. Однако во втором случае высокая точность позиционирования выходного звена достигается более сложным и дорогим способом.

Микроробот со сферическим шарниром относится к системам с параллельной кинематикой и использованием силы трения. Сферический шарнир микроробота имеет три степени подвижности и представляет собой шар, установленный на опоры-толкатели, которые служат приводными элементами. Рабочий орган в такой системе крепится непосредственно на поверхности шара, усилие с пьезопривода на шар передается за счет силы трения. Поскольку поверхность шара однородна (кроме места крепления рабочего органа), то зона действия рабочего органа практически совпадает со сферой. Таким обра-



зом, можно получать углы сервиса манипулятора почти 360° по трем координатам, что является хорошим показателем. Сферический шарнир позволяет изменять усилие прижима шара к опорам при помощи внешнего магнитного поля и тем самым повышать нагрузочную способность микроробота.

Для микророботов требуется наличие обратной связи по различным параметрам, таким, как усилие на схвате, положение в пространстве и др.

Такие конструкции ввиду их перспективности уже разрабатывались и у нас, и за рубежом. В СССР этот вопрос исследовал Р.Ю. Бансявичус в Каунасском политехническом институте (КПИ). Микроробот [1], показанный на рис. 1, а, представляет собой манипулятор на основе сферического шарнира, приводимого в движение пьезокерамическими стержнями, совершающими изгибные и продольные ультразвуковые колебания.

Эта система имеет микропроцессорный блок управления и позволяет осуществлять перемещение сферы по трем координатам. Кинематическая цепь замыкается при помощи поджимной пружины. Данное устройство имеет зону обслуживания менее 120° в плоскости.

Микроманипуляторы на основе сферического шарнира разрабатывают также ученые в Германии. Это микроробот Miniman [2], созданный в университете г. Карлсруе и предназначенный для использования в нанотехнологиях с ручным управлением от джойстика. В его конструкции присутствует сферический шарнир с закрепленным на нем рабочим органом (рис. 2, б) и используются многослойные прямоугольные пьезоэлектрические столбики. Удалось собрать полностью работоспособный прототип с меди-

цинской микропипеткой. Но данная конструкция из-за наличия шести отдельных приводов требует сложной системы управления и обладает избыточными кинематическими связями.

В макете разрабатываемого микроробота, представленном на рис. 2 а, в качестве привода используются три трубки из пьезокерамики с толкателями, а передаточным механизмом служит сферический шарнир.

Каждая из опор шара благодаря обратному пьезоэффекту подвижна по трем направлениям — вдоль оси пьезотрубки и перпендикулярно ее оси в двух направлениях, поэтому мы можем управлять перемещением шара в трех плоскостях. Направление вращения изменяется путем смены знака подаваемого напряжения. Усилие с опор на полированный шар передается силой трения. Соответственно, чем выше качество обработки шара, тем лучше показатели привода. На самом шаре закреплен рабочий орган, которым может быть и микросхват для переноса либо позиционирования каких-либо деталей, и микропипетка.

Так как привод работает на ультразвуковой частоте, можно получить хорошую разрешающую способность и соответственно высокую точность позиционирования (до $0,1$ мкм). Для обеспечения подвижности в нужных направлениях электроды на пьезокерамической трубке дорабатываются особым способом. На внешнем электроде вытравливаются дорожки-разделители, чтобы в итоге получить 8 отдельных электродов. Это позволяет задавать нужные траектории движения опоры-толкателя за счет изгиба в двух плоскостях и изменения длины пьезоактюатора. Практически для движения шара нужно получить на выходе траекторию эллиптической формы (рис. 2, б). Как

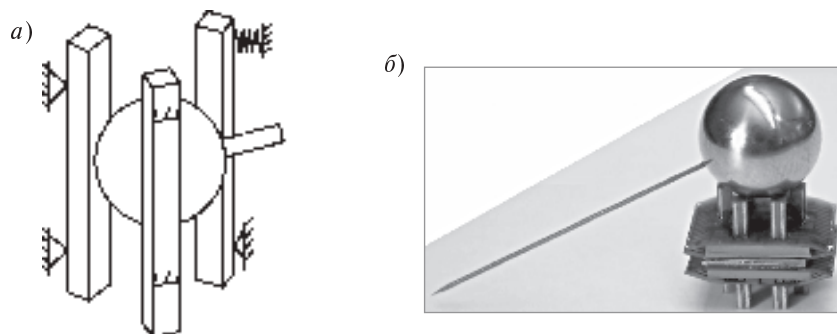


Рис. 1. Пьезоэлектрические манипуляторы на базе сферического шарнира:
а — манипулятор КПИ; б — миниробот Miniman

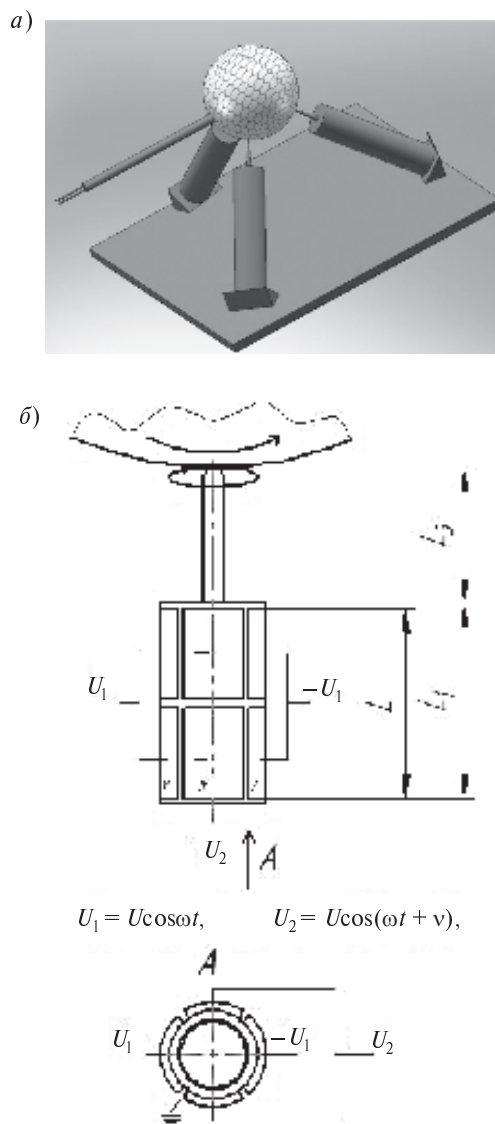


Рис. 2. Исследуемый микроробот:
а — экспериментальный образец;
б — пьезопровод

показано на рисунке, на электроды подаются различные управляющие напряжения.

Теоретические исследования привода микроробота

В ходе исследования применимости пьезотрубки в качестве привода микроробота был произведен аналитический расчет для определения возможной траектории движения толкателя привода.

Для задания траекторий толкателя привода (рис. 3, а) в направлениях x , y , z необходимо

определить перемещения пьезокерамической трубки в указанных направлениях. Изгиб пьезокерамической трубки в направлениях x , y осуществляется подачей противоположного напряжения на электроды (обкладки) — соответственно X , Y .

В случае подачи напряжения U на обкладки X трубка изогнется. В этом случае возникнут деформации материала трубки и механические напряжения в плоскости xz , а также в параллельных ей плоскостях. Это связано с тем, что электроды X — активные, т. е. на их участках действует обратный пьезоэффект, а электроды Y — пассивные, так как к ним не приложено электрическое напряжение U и участки трубки под ними ведут себя как пассивный упругий материал. В связи с этим возникают изгибающие моменты в плоскости xz .

Дальнейшие расчеты ведутся при следующих допущениях: при изгибе плоскость поперечного сечения не деформируется, а лишь поворачивается; перемещения во много раз меньше самих размеров трубки; толщина стенок трубки на много меньше внешнего диаметра трубки; обратный пьезоэффект считаем линейным.

Для любого поперечного сечения трубки (рис. 3, б) элементарный изгибающий момент в плоскости xz определяется формулой

$$dM^{xz} = R_{cp}^2 \delta T(\theta) d\theta,$$

где $T(\theta)$ — зависимость механического напряжения от угловой координаты θ рассматриваемого кольцевого сектора. Координата по оси ox этого сектора

$$x = R_{cp} \cos \theta.$$

Из теории сопротивления материалов известно, что при изгибе механические напряжения изменяются по линейному закону по высоте сечения. Для активного участка сечения трубки с координатой z (где действует обратный пьезоэффект) механическое напряжение

$$T_a(\theta) = A + B R_{cp} \cos \theta,$$

для пассивного участка сечения трубки механическое напряжение

$$T_p(x) = Cx \text{ или } T_p(\theta) = C R_{cp} \cos \theta.$$

Изгибающий момент в любом поперечном сечении трубки в плоскости xz

$$M^{xz} = 2 \int_0^{\theta_1} R_{cp}^2 \delta T_a(\theta) d\theta + 2 \int_0^{\theta_2} R_{cp}^2 \delta T_p(\theta) d\theta +$$

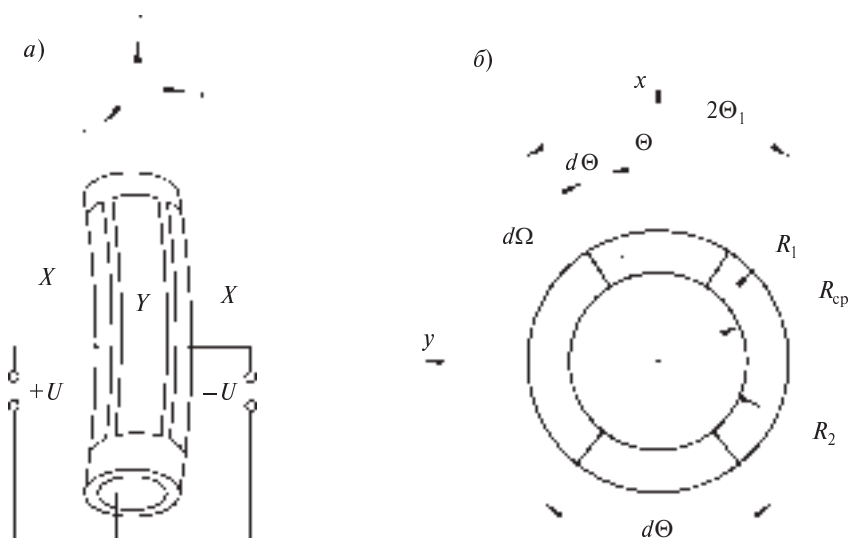


Рис. 3. Изгиб трубки под действием напряжения на электродах X (а) и поперечное сечение (б) пьезотрубки

$$+ 2 \int_{\theta_1}^{\pi/2-\theta_1} R_{cp}^2 \delta T_p(\theta) d\theta + 2 \int_{\theta_2}^{\pi/2-\theta_2} R_{cp}^2 \delta T_p(\theta) d\theta,$$

где $2\theta_1$ — угол сектора верхнего электрода X ; выражение после интегрирования примет вид

$$M^{xz} = 2R_{cp}^2 \delta \left[A(\theta_1 + \theta_2) + R_{cp}(B - C) \times \right. \\ \left. \times (\sin \theta_1 + \sin \theta_2) + R_{cp}C(\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \right].$$

На трубку не действуют никакие внешние силы и моменты, поэтому в любом поперечном сечении на длине L электрода X изгибающий момент $M^{xz} = 0$:

$$A(\theta_1 + \theta_2) + R_{cp}(B - C)(\sin \theta_1 + \sin \theta_2) + \\ + R_{cp}C(\cos \theta_1 + \cos \theta_2) = 0.$$

Постоянные коэффициенты A , B , C могут быть определены следующим образом:

$$B = C \quad \text{и} \quad A = -\frac{d_{31}U}{s_{11}^E \delta},$$

где d_{31} — пьезоэлектрический модуль; s_{11}^E — постоянная податливости пьезокерамики;

$$C = \frac{d_{31}(\theta_1 + \theta_2)U}{s_{11}^E \delta R_{cp}(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)}.$$

Перемещение оси трубки по x (рис.4) при подаче напряжения U при $z = L$, т. е. на конце электрода X :

$$\xi_{Lx} = \frac{d_{31}(\theta_1 + \theta_2)L^2U}{2\delta R_{cp}(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)};$$

в частном случае при $\theta_1 = \theta_2 = \frac{\pi}{4}$ (электроды X

занимают дуги по четверти окружности каждый) это перемещение имеет вид

$$\xi_{Lx} = \frac{\sqrt{2}\pi d_{31}L^2U}{8\delta R_{cp}}.$$

При подаче такого же напряжения на электроды Y перемещение ξ_{Ly} будет иметь то же значение.

Действие электрического напряжения эквивалентно действию момента, приложенного на конце электрода [5], так как в обоих случаях

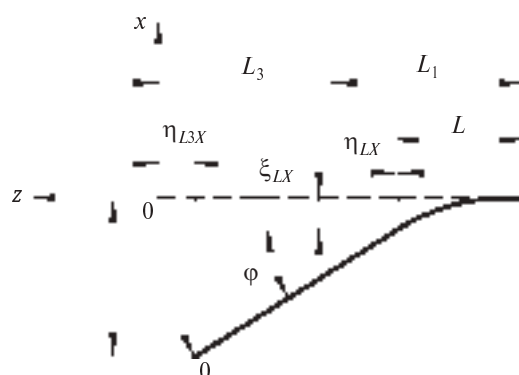


Рис. 4. Положение продольной оси манипулятора при подаче напряжения на электроды X

и перемещение и форма изогнутой оси трубки одинаковы:

$$\xi_{Lx} = \frac{\lambda M_E L^2}{2}.$$

отсюда эквивалентный момент, соответствующий действию напряжения U , имеет вид

$$M_E = \frac{2\xi_{Lx}}{\lambda L^2},$$

где $\lambda = \frac{4s_{11}^E}{\pi(R_1^4 - R_2^4)}$ — податливость сечения трубки.

При изгибе трубки кроме поперечного перемещения ξ_{Lx} происходит продольное перемещение точек на оси трубки:

$$\eta_{Lx} = \frac{2\xi_{Lx}^2}{3L}.$$

Причем $\eta_{Lx} \ll \xi_{Lx}$, так как ξ_{Lx} — малая величина по сравнению с L . Для точки О (конец толкателя) продольное перемещение

$$\eta = \eta_{Lx} + (L_1 + L_3 - L) \frac{\phi^2}{2},$$

где $\phi = \frac{2\xi_{Lx}}{L}$ — угол поворота сечения на конце электрода.

На конце толкателя продольное перемещение

$$\eta_{L3x} = \frac{2\xi_{Lx}^2}{L} \left(\frac{1}{3} + \frac{L_1 + L_3 - L}{L} \right).$$

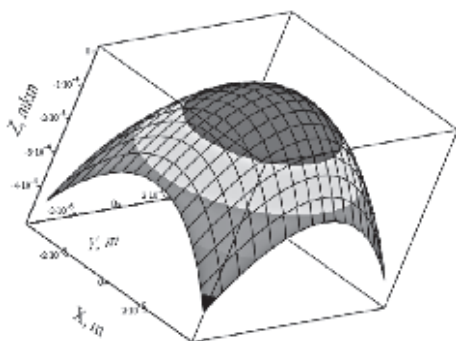


Рис. 5. Геометрическое место точек конца толкателя при подаче напряжений на электроды X , Y

Для определения поверхности, которая является геометрическим местом точек траектории толкателя привода при подаче напряжений на электроды X , Y , необходимо составить зависимость продольного перемещения толкателя привода при подаче напряжения на все электроды $\eta_{L3} = f(\xi_{L3x}, \xi_{L3y})$, где ξ_{L3x} — поперечное перемещение толкателя привода при подаче напряжения на электроды X , ξ_{L3y} — поперечное перемещение толкателя привода при подаче такого же напряжения на электроды Y . Эти перемещения можно выразить через ξ_{Lx} и ξ_{Ly} :

$$\xi_{Lx, Ly} = \xi_{L3x, L3y} \frac{L}{2L_1 + 2L_3 - L};$$

$$\eta_{L3} = \frac{2}{L} \left(\frac{1}{3} + \frac{L_1 + L_3 - L}{L} \right) \times$$

$$\times \left[\left(\xi_{L3x} \frac{L}{2L_1 + 2L_3 - L} \right)^2 + \left(\xi_{L3y} \frac{L}{2L_1 + 2L_3 - L} \right)^2 \right].$$

Полученная зависимость, рассчитанная при помощи MathCad при значениях $L = 25$ мм, $L_1 = 30,5$ мм, $L_2 = 10$ мм, $R_1 = 5$ мм, $R_2 = 4$ мм, $d_{31} = 115 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, напряжениях $U = \pm 300$ В, имеет вид купола (рис. 5).

Пространственная траектория толкателя привода при подаче напряжения на изгибные электроды (по осям x и y перемещения ξ_{L3x} и ξ_{L3y} имеют размерность в метрах, а по оси z перемещение η_{L3} — в мкм)

Из графика (рис. 5) видно, что перемещение толкателя привода по осям x , y на четыре порядка выше, чем перемещение толкателя привода по оси z .

Таким образом, для обеспечения эллиптических траекторий перемещение η_{L3} не играет существенную роль, так как его значение намного меньше высоты микронеровностей полированной поверхности шара.

Перемещение по оси z для создания эллиптической траектории можно найти, предположив, что перемещение будет в два раза меньше, чем при подаче одинакового по величине напряжения на все электроды X и Y :

$$\eta = 0,5 d_{31} \frac{LU}{R_1 - R_2}.$$



При указанных параметрах перемещение $\eta = 0,43$ мкм. Таким образом, для полированной поверхности шара при шероховатости, меньшей указанного значения, движение шара возможно.

Система управления микроробота

Рассмотрим теоретически задачу позиционирования сферы по двум координатам. Точная модель системы, описывающая угол поворота ϕ в зависимости от амплитуды приложенного к актюаторам напряжения U и сдвига фаз между сигналами, подаваемыми на смежные электроды γ , очень сложна для аналитического описания. В статье [6] модель ультразвукового однокоординатного пьезодвигателя соответствует синхронному электродвигателю. Таким же образом, проводя аналогию с синхронным двигателем, можно записать начальное приближение модели в виде

$$\dot{\omega} = kU \sin \gamma - \Delta^{-1} \omega,$$

$$\dot{\phi} = \omega,$$

где ω — угловая скорость вращения; ϕ — угол поворота в плоскости, k — коэффициент пропорциональности; динамика системы промоделирована звеном первого порядка с постоянной времени Δ .

Управляющие воздействия изменяются в пределах $U \in [0, U_{\max}]$, $\gamma \in [-\pi/2, \pi/2]$.

Решим задачу стабилизации нелинейной системы с помощью линейной обратной связи. Далее будет предложен новый численный метод синтеза регулятора фиксированной структуры, основанный на моделировании Монте-Карло и идентификации параметров объекта управления.

Большинство нелинейных систем могут быть управляемы с заданными условиями качества с помощью линейных контроллеров, что объясняется достаточной гладкостью их переходных характеристик в рабочих областях. Также известно, что линейные регуляторы оптимальны для ряда нелинейных систем с нелинейными функционалами качества управления [1]. В общем случае применимость линейного управления к нелинейной системе зависит от ее степени нелинейности (которая может быть выражена как операторная норма разности между системой и ее лучшей линейной аппроксимацией) и от критериев качества. За счет очевидной простоты ре-

ализации и настройки линейных регуляторов в инженерной практике их применение более желательно, чем нелинейных.

Рассмотрим динамическую систему с замкнутой обратной связью $\Sigma: U \rightarrow Y$. Пусть C — контроллер, работающий по сигналу ошибки $C: U \times Y \rightarrow V$, $C: u - y \mapsto v$ и подключенный ко входу объекта управления $P: V \rightarrow Y$.

Любой сигнал $x(t)$ в системе Σ описывается зависимостью от него самого $f(x(t))$, поскольку его значение возвращается через обратную связь: $f: X \times U \rightarrow X$, $x = f(x, u)$. Если замыкание обратной связи делает систему устойчивой, то f — сжимающее отображение для всех (x, u) из рабочей области системы, а x — его неподвижная точка.

Отсюда сразу же можно сформулировать задачу синтеза: необходимо найти такой линейный оператор $C: U \rightarrow V$, чтобы отображение $(P \circ C)(u - y) = y$ было сжимающим для всех допустимых u .

Кроме устойчивости, реализация практического контроллера должна включать свойства асимптотического слежения (для заданного интервала времени T и точности ε выполняется $\|y_k - u_k\| \leq \varepsilon$, где $k \geq T$) и робастности (система должна быть устойчива и обеспечивать установку выхода с заданной точностью для всех объектов управления $\phi^* \in \Phi$ из заданного класса).

Пусть P — нелинейная система вида

$$\dot{y} = \varphi(y, v),$$

где $\varphi: R^n \times R^n \rightarrow R^n$; $u, y \in R^n$; $k \in R_+^n$.

Линейный регулятор будем искать в виде

$$\dot{v} = Fv + E(u - y),$$

где $u_k \in R^n$ — референтный сигнал; $F, E \in R^{n \times n}$.

Пространство матриц $\mathbb{S} = R^{n \times n} \times R^{n \times n}$ снабдим целевой функцией $\mu: \mathbb{S} \rightarrow R_+^n$ такой, что $\mu(\Theta) = 0$, когда контроллер $\Theta \in \mathbb{S}$ полностью удовлетворяет заданным свойствам устойчивости, робастности и заданной точности, $\mu(\Theta) > 0$ — в других случаях.

Качество регулирования может быть оценено двумя параметрами: величиной перерегулирования d и асимптотической точностью ε , которые определяются при подаче на вход замкнутой системы единичного импульса $u(t) = u^* \cdot 1(t)$, где $u^* \in U = [u_{\min}, u_{\max}]$:

$$\varepsilon = \|u(T) - y(T)\|;$$

$$d = \sup_{t \leq T} \|u(t) - y(t)\|,$$

где \hat{t} — минимальное время, в котором $u(\hat{t}) = y(\hat{t})$; T — конечное время управления.

Целевая функция может быть записана в виде

$$\mu(\Theta) = \max_{u^* \in U} \max_{\Phi^* \in \Phi} \{(1-\eta)\varepsilon(\Theta) + \eta d(\Theta)\},$$

где $\eta \in [0,1]$ — весовой коэффициент.

Далее будем полагать, что класс объектов управления Φ параметризован подмножеством евклидова пространства R^m (например интервалами значений параметров модели).

Оценка худшего случая может быть заменена на индекс средней производительности вида

$$\mu(\Theta) = \frac{1}{|U|} \frac{1}{|\Phi|} \times \int_{u^* \in U} \int_{\Phi^* \in \Phi} \{(1-\eta)\varepsilon(\Theta) + \eta d(\Theta)\} du d\Phi,$$

где интегрирование (суммирование) производится по всему пространству U и Φ .

Численное значение μ в последнем случае может быть оценено методами Монте-Карло с помощью моделирования замкнутой системы Θ на выборках из непрерывных областей U и Φ . В этом случае мы можем получить оценку $\mu(\Theta)$ как математическое ожидание

$$\bar{\mu}(\Theta) = \frac{1}{|\bar{U}|} \frac{1}{|\bar{\Phi}|} \sum_{u^* \in \bar{U}} \sum_{\Phi^* \in \bar{\Phi}} \{(1-\eta)\varepsilon(\Theta) + \eta d(\Theta)\},$$

где $\bar{U} \subset U$, $\bar{\Phi} \subset \Phi$ — конечные выборки.

Истинное значение $\mu(\Theta)$ оценивается интер-

вально: $\mu(\Theta) = \bar{\mu}(\Theta) \pm \lambda \bar{\sigma} \sqrt{|\bar{U}| |\bar{\Phi}|}^{-1}$, где $\bar{\sigma}$ — выборочное среднее квадратичное отклонение, λ — квантиль нормального распределения для заданной доверительной вероятности.

В качестве алгоритма минимизации μ удобно применить рандомизированный алгоритм SPSA [2, 3]. Использование в данной задаче локального алгоритма связано с тем, что траектория оптимизации в пространстве поиска является непрерывной и с начальной точки траектории, которая может быть выбрана как устойчивый пропорциональный регулятор, свойство устойчивости сохраняется на всей траектории. Про-

изводительность алгоритма SPSA не зависит от размерности задачи — на каждой итерации семплируются только две точки, что позволяет применять это даже в случае, когда вместо имитационной модели для вычисления целевой функции используется реальный объект. В последнем случае синтез регулятора фактически является решением задачи идентификации объекта управления.

Алгоритм SPSA использует итерационную схему

$$\Theta_{k+1} = \Theta_k - a_k g_k(\Theta_k),$$

где k — итерация алгоритма; $\Theta \in \mathbb{R}^m$, $|\Theta| = m = 2^n$, a_k — убывающая последовательность положительных коэффициентов; $g_k(\cdot)$ — аппроксимация градиента вида

$$g_{ki}(\Theta_k) = \frac{\mu(\Theta_k + c_k \Delta_k) - \mu(\Theta_k - c_k \Delta_k)}{2c_k \Delta_{ki}},$$

$\Delta_k \in \{-1, +1\}^m$ — независимо распределенные по закону Бернулли случайные величины.

Последовательности c_k и a_k обладают свойствами: $a_k, c_k > 0$, $a_k, c_k \rightarrow 0$ при $k \rightarrow \infty$,

$$\sum_{k=0}^{\infty} a_k = \infty, \sum_{k=0}^{\infty} a_k^2 / c_k^2 < \infty.$$

Предложенный алгоритм поиска параметров линейного регулятора был реализован в среде MATLAB и протестирован при синтезе управляющего контроллера для начального приближения модели перемещения сферы. В качестве параметров модели взяты нормированные значения: $U_{\max} = 1$, $\Delta = 1$, $k = 1$. Значение целевой функции в процессе оптимизации уменьшилось с 2,1 до $2,5 \cdot 10^{-2}$ за 150 итераций. В результате реакция системы с оптимизированными параметрами регулятора отличается малой асимптотической ошибкой (менее 0,2 %) и перерегулированием не более 0,7 %.

Электронная часть системы управления (рис. 6) состоит из аналогового интерфейса с оптическими датчиками, программируемой логической интегральной схемы (FPGA), двух полных H-мостов на IGBT транзисторах, нагруженных через фильтр нижних частот на резонаторы. Внутри FPGA реализована логика определения положения манипулятора в сферических координатах (α , β). Пропорционально-дифференциальный

регулятор (PID) по сигналу ошибки между текущим положением сферы (α , β) и заданным (α^* , β^*) формирует значения амплитуд (U_1 , U_2) сигналов и сдвиг фаз (ϕ) между ними. Генератор широтно-импульсно модулированных сигналов (ШИМ) формирует прямоугольные импульсы со скважностью, пропорциональной гармоническим функциям, которые подаются на мосты из IGBT транзисторов. Для получения в цифровом виде гармонических сигналов заданной частоты используется алгоритм прямого цифрового синтеза (direct digital synthesis).

Дальнейшая работа по созданию системы управления будет направлена на создание бесконтактного датчика положения и синтез с помощью предложенного алгоритма линейного регулятора с применением реального объекта управления вместо модели для вычисления целевой функции.

Обратные связи

Система управления за счет обратной связи по положению должна обеспечивать требуемую точность позиционирования рабочего органа (порядка $0,5 \cdot 10^{-3}$ рад.). Эта задача сложна для случая использования сферического шарнира.

Самый простой способ — использование трех однокоординатных датчиков перемещения типа роликов со счетчиком оборотов, контактирующих с поверхностью шара в трех взаимно перпендикулярных направлениях (как в компьютерной мыши с шариком на ее нижней поверхности). Точность такого способа получения информации по обратной связи невысока и не подходит для мик-

романипуляторов. Нежелателен механический контакт датчиков с поверхностью шарнира.

Второй способ организации обратной связи — система технического зрения для определения координат рабочего органа микроробота. У данной системы высокая стоимость, большие габариты и низкое быстродействие.

Третий способ заключается в использовании оптического метода считывания трех угловых координат сферы. Возможны различные варианты построения координатной сетки. Первый из них — классический метод меридианов и параллелей (как на глобусе). Но такая система подходит для двухкоординатных систем, а для трехкоординатных ее точность недостаточна. Второй способ — нанесение сетки из многоугольников (рис. 7, а). Для определения углового положения сферы по трем координатам необходимо иметь три оптических датчика, каждый из которых представляет оптопару приемник — передатчик, (рис. 7, б). При пересечении линий сетки поступают импульсы, считывая которые система управления определяет положение и скорость перемещения рабочего органа. Диапазон измерений по каждой угловой координате — около 2π . Система не имеет физического контакта с поверхностью сферы.

Испытания системы подтвердили ее работоспособность. С данным образцом был проведен ряд экспериментов. В первую очередь был произведен эксперимент с отдельно взятой опорой без сферы (рис. 7, в). Под микроскопом было зафиксировано передвижение опоры, измерена максимальная амплитуда ее колебаний (около 0,1 мм) в резонансе. Далее проводились эксперименты

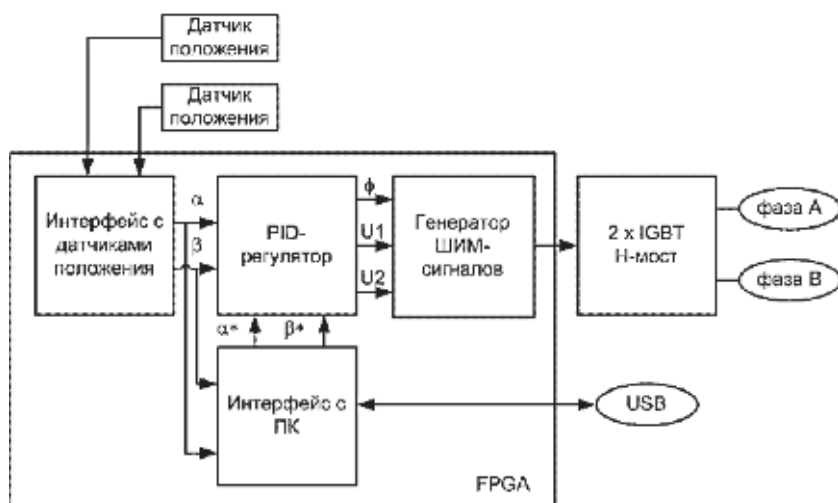


Рис. 6. Структурная схема системы управления

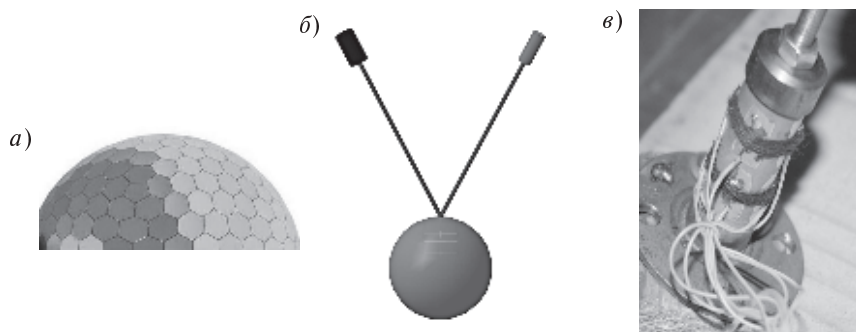


Рис. 7. Система управления
(а — поверхность шара; б — схема обратной связи; в — пьезопровод опоры)

с самим манипулятором с целью доказательства его работоспособности и определения его характеристик, в их ходе получены следующие результаты: на частоте питающего напряжения 320 Гц в диапазоне от 100 до 300 В получено стабильное вращение в обе стороны стальной сферы диаметром 22 мм, максимальная скорость вращения поверхности сферы составила 1 мм/мин.

Предварительные эксперименты показали, что для получения стабильного и управляемого

перемещения рабочего органа необходимо иметь систему управления, которая бы обеспечивала:

- поддержку резонансного режима;
- регулировку скорости выходного звена посредством изменения подаваемого на пьезоактюаторы напряжения;
- обеспечение фиксированного сдвига фаз напряжений, подаваемых на пьезоактюаторы;
- надежную коммутацию напряжения, подаваемого на актюаторы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Schweickhardt, T.** Nonlinearity Assessment and Linear Control of Nonlinear Systems [Текст] / T. Schweickhardt. / Ph. D. thesis Institute for Systems Theory and Automatic Control, University of Stuttgart.— 2006.
2. **Spall, J.C.** Introduction to Stochastic Search and Optimization: Estimation, Simulation and Control [Электронный ресурс] / J.C. Spall / Wiley, Hoboken.— Book Web site: www.jhuapl.edu/ISSO.— NJ.— 2003, 618 p.
3. **Вахитов, А.Т.** Алгоритм стохастической аппроксимации с пробным возмущением на входе в нестационарной задаче оптимизации [Текст] / А.Т. Вахитов, О.Н. Граничин, Л.С. Гуревич // Автоматика и телемеханика.— 2009. № 11.— С. 70—79.
4. **Бансявичус, Р.Ю.** Промышленные роботы для миниатюрных изделий [Текст] / Р.Ю. Бансявичус, А.А. Иванов, Н.И. Камышный; под ред. Шаньгина В.Ф. — М.: Машиностроение, 1985.
5. **Смирнов, А.Б.** Мехатронные модули микроперемещений технологических машин [Текст] / А.Б. Смирнов.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008.
6. **Hua Zhu.** Modeling of a cylindrical ultrasonic motor based on the single crystals [Текст] / Hua Zhu, Laihui Luo, Chao Chen and Chunsheng Zhao // Journal of Electroceramics.— Vol. 20, № 3—4.— P. 243—249.

УДК 621.822

В.Ю. Иванов

О ВЛИЯНИИ КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ ШАРНИРА НА РЕШЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ

Рассмотрена плоская задача о внутреннем контакте упругих тел, ограниченных цилиндрическими поверхностями близких диаметров, связанная с определением контактных параметров:

контактного угла;
закона распределения контактных давлений (напряжений) по углу контакта с учетом диаметрального габарита полого тела.

Такая постановка задачи приближает ее к реальной конструкции. В рассмотрение введен

безразмерный диаметральный параметр $m = \frac{B}{d_2}$,

где B, d_2 — размеры согласно рис.1.

Задача решается в предположении, что тела являются абсолютно гладкими, а в контакте отсутствуют силы трения.

Вначале остановимся на решениях, связанных с определением контактных параметров при бесконечных размерах наружного тела. Такая постановка дает возможность получить строгое аналитическое решение задачи. В нашем случае это позволит дать сравнительный анализ решений в первом и втором случае и показать степень влияния на контактные параметры конечных размеров наружного тела.

По-видимому, впервые закон распределения контактного давления $p_r(\varphi)$ по площадке контакта при почти равных диаметрах d_1, d_2 и $B = \infty$, для абсолютно жестких и гладких контактирующих деталей из одинакового материала был рассмотрен И.Я. Штаерманом [1]. В его решении, доведенном до практических результатов, в основу положена формула Бусинеска о сжатии двумя противоположно направленными силами цилиндра и бесконечной пластины с отверстием. Решение найдено интегрированием нагрузок на дуге контакта и представлено интегральным уравнением

$$2 \sum_k v_k \frac{d_k}{2} \int_{-\varphi}^{\varphi} p_r(\varphi_i) \left(\cos(\varphi - \varphi_i) \ln \left(\operatorname{tg} \frac{\varphi - \varphi_i}{2} \right) - \right.$$

$$\left. - \cos \varphi \cos \varphi_i \ln \left(\operatorname{tg} \frac{\varphi_i}{2} \right) \right) d\varphi_i -$$

$$- \sum \chi_k \frac{d_k}{2} \int_{-\varphi}^{\varphi} p_r(\varphi_i) (\sin(|\varphi - \varphi_i|) - \cos \varphi \sin|\varphi_i|) \times$$

$$\times d\varphi_i + v_1 d_1 (1 - \cos \varphi) \int_{-\varphi}^{\varphi} p_r(\varphi_i) d\varphi_i =$$

$$= \frac{(d_2 - d_1)}{2} (1 - \cos \varphi),$$

где v_k, χ_k — постоянные, характеризующие

упругие свойства материалов, $v_k = \frac{1 - \mu_k^2}{\pi E_k}$, $\chi_k =$

$= \frac{(1 + \mu_k)(1 - 2\mu_k)}{2E_k}$, $k = 1, 2$; $-\varphi \leq \varphi_i \leq \varphi$ — угловая

координата; μ_k, E_k — соответственно коэффициент Пуассона и модуль первого рода.

Уравнение (1) решено приближенным методом конечных разностей совместно с условием равновесия

$$\int_{-\varphi}^{\varphi} \frac{d_1}{2} p_r(\varphi_i) \cos \varphi_i d\varphi_i = \frac{F}{t}. \quad (2)$$

В работе [2] для нахождения закона распределения контактных давлений (напряжений) просто рекомендуется принимать в приближенной форме косинусоидальное распределение:

$$p_r(\varphi_i) = p_0 \cos \left(\frac{\pi \varphi_i}{2\varphi} \right). \quad (3)$$

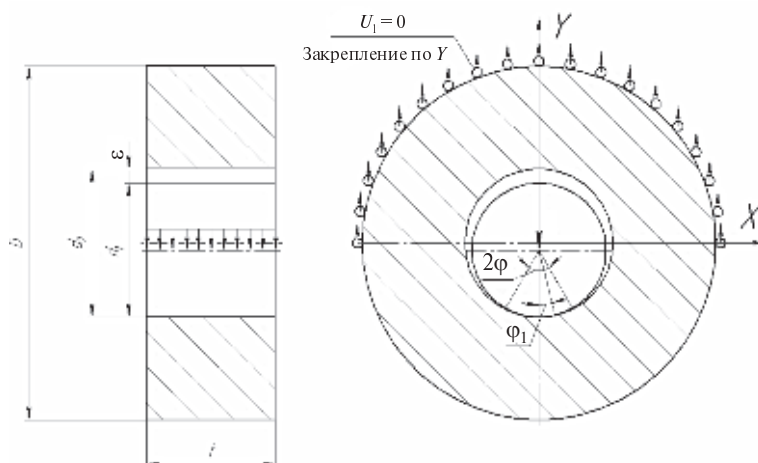


Рис. 1. Расчетная схема

При подстановке (3) в (2) получены выражения:

для определения максимального контактного давления

$$p_0 = \frac{F(\pi^2 - 4\phi^2)}{2\pi d_1 t \phi \cos \phi}, \quad (4)$$

для определения половины угла контакта (приближенное):

$$\phi = \arctg 2 \sqrt{\sum_k v_k \frac{2F}{\varepsilon t}}. \quad (5)$$

На рис. 2 можно видеть характер распределения контактного давления (напряжения) по углу контакта, рассчитанного по формуле (3): слева для сочетания «сталь — сталь», справа — «сталь — бронза». Параметры соединения указаны ниже.

Теперь остановимся на задаче влияния конечных размеров наружного тела шарнира на те же контактные параметры.

Для учета влияния жесткости охватывающего тела в связи с ее конечностью в реальных соединениях был использован метод конечных элементов (МКЭ), в котором модель формировалась из плоских конечных элементов (КЭ), при этом охватывающее тело моделировалось элементами четырехугольной формы, а в модели стальной оси использовался смешанный тип сетки (элементы четырехугольной и треугольной формы). Узлы данных типов элементов имеют две степени свободы — перемещения U_X и U_Y . Задача решалась в симметричной постановке (половина соедине-

ния), в связи с этим на серединных гранях соединения задавалось крепление, соответствующее условию симметрии, т. е. $U_X = 0$. На верхней части наружной поверхности охватывающего тела накладывалось ограничение перемещению по оси Y , т. е. $U_Y = 0$. Конечно-элементная модель соединения представлена на рис. 3.

В модели на рис. 3 нагрузка F равномерно распределена по всей площади поперечного сечения оси и направлена в противоположную сторону оси Y .

Данная задача решалась в линейной постановке (контакт КЭ оси и втулки задавался узел в узел). Такая модель позволяет: во-первых, сопоставить результаты исследования при бесконечных и конечных размерах шарнира и, во-вторых, показать степень влияния, связанную с учетом конечности размеров шарнира. Кроме того, следует отметить и такие положительные стороны данного подхода по сравнению с контактной задачей в нелинейной постановке, как простота задания контактных элементов и меньшая трудоемкость (сокращение машинного времени на решение).

Исследование напряженного состояния произведено для пары ось — втулка при сочетаниях сталь — сталь, сталь — бронза и различных значений безразмерного параметра m .

Параметры соединения (см. рис. 1) следующие: нагрузка $F = 128,5$ кН;

диаметр оси $d_1 = 110$ мм;

диаметр B охватывающего тела 160, 195, 230, 265, 300 мм;

длина соединения $t = 110$ мм;

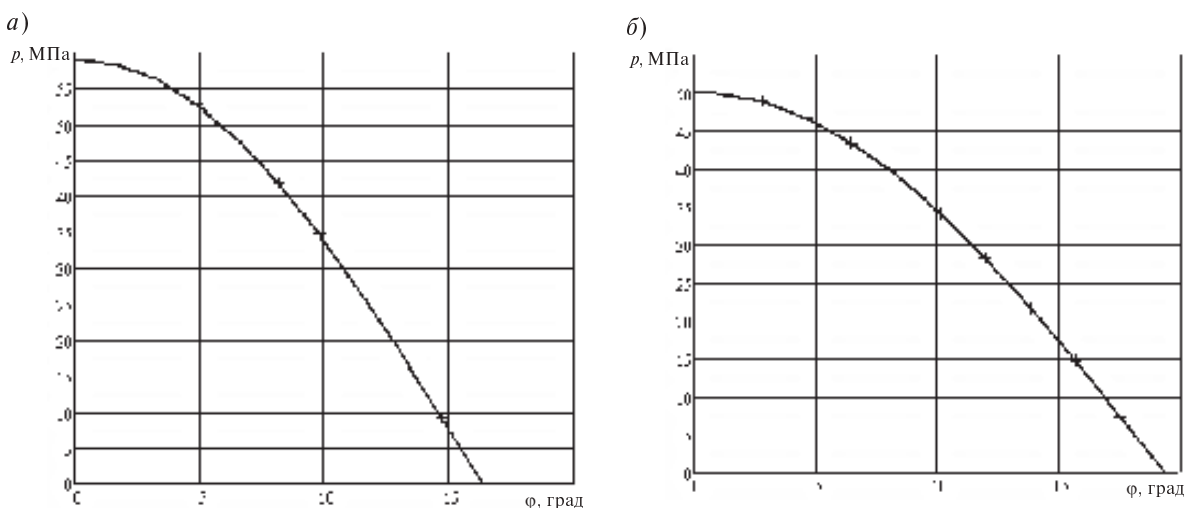


Рис. 2. Контактные параметры напряженного состояния, рассчитанные по формуле (3)

диаметральный зазор как у приработавшейся пары, $\varepsilon = 0,3$ мм, что соответствует среднему зазору в сопряжении $\phi 110 \frac{H9}{f9}$; материалы тел со-
единения — бронза с характеристиками физических свойств $E_1 = 1,1 \cdot 10^5$ МПа, $\mu_1 = 0,33$ и сталь с характеристиками $E_2 = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $\mu_2 = 0,3$.

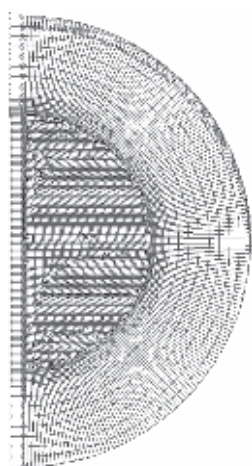


Рис. 3. Конечно-элементная модель соединения

Контактные параметры напряженного состояния для охватывающего тела, рассчитанные МКЭ для различных сочетаний материалов контактных пар и значений параметра m , представлены на рис. 4, 5. Кривая 1 соответствует контактному давлению (напряжению) при $m = 1,45$; 2 — $m = 1,77$; 3 — $m = 2,09$; 4 — $m = 2,41$; 5 — $m = 2,72$; 6 — $m = \infty$.

Из сопоставления результатов решения МКЭ с результатами работ [1, 2] видна степень влияния на значения контактных параметров наружного габарита охватывающего тела. В частности из рис. 4 видно, что наиболее значительное влияние имеет место при изменении параметра в диапазоне $m = 1,45-2,1$. Так например, для пары сталь—сталь при $m = 1,45$ контактное давление равномерно распределено по углу контакта и не превышает значения равного 25 МПа, в то время как при $m = \infty$ значение максимального давления достигает 45 МПа, что выше в 1,8 раза. При этом существенно различаются и распределения давления по углу контакта.

С другой стороны уменьшение m приводит к снижению прочностной надежности деталей

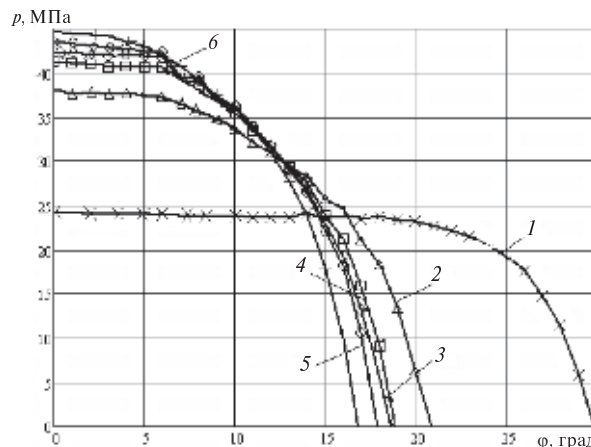


Рис. 4. Контактные параметры напряженного состояния для сочетания сталь — сталь, рассчитанные МКЭ

шарнира. Возникает вопрос о целесообразности малых m .

Если рассматривать полый цилиндр как элемент проушины, скажем стреловой системы крана, то, согласно исследованиям профессора С.А. Соколова, параметр m рекомендуется назначать в пределах 1,45–4 [4, с. 353]. Таким образом, и с точки зрения прочностной надежности шарнирного соединения изучение влияния безразмерного параметра m следует признать целесообразным.

В научной литературе влияние диаметрального габарита полого цилиндра изучалось лишь на основе экспериментов. Так эксперименты, описанные в работе [3] для $m = 1,5-3$, позволили подобрать эмпирическую формулу для определения половины угла контакта

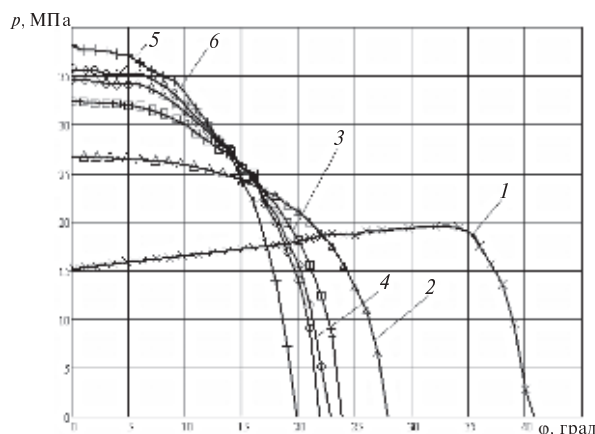


Рис. 5. Контактные параметры напряженного состояния для сочетания сталь — бронза, рассчитанные МКЭ

$$\varphi = \frac{\pi}{2} \operatorname{th} \left(0,68 \frac{m}{m-1} \sqrt{\frac{2F}{E\epsilon t}} \right), \quad (6)$$

где $E = \frac{2E_1E_2}{E_1+E_2}$ — приведенный модуль первого рода.

При этом закон распределения контактных давлений принимался по аналогии с распределением Г. Герца (эллиптический закон) в виде

$$p_r(\varphi_i) = p_0 \sqrt{1 - \frac{\varphi_i^2}{\varphi^2}}. \quad (7)$$

С учетом угла контакта условие равновесия (2) примет вид

$$\begin{aligned} F &= t d_1 \int_0^\varphi p_r \varphi_i \cos \varphi_i d\varphi_i = \\ &= t p_0 d_1 \int_0^\varphi \sqrt{1 - \frac{\varphi_i^2}{\varphi^2}} \cos \varphi_i d\varphi_i = \frac{\pi}{2} t p_0 d_1 I_1 \varphi, \end{aligned} \quad (8)$$

откуда максимальное контактное давление

$$p_0 = \frac{2F}{\pi d_1 t I_1(\varphi)}, \quad (9)$$

где $I_1(\varphi)$ — функция Бесселя первого рода.

Характер распределения контактного давления для охватывающего тела, рассчитанный по формуле (7) для различных сочетаний материалов контактных пар и значений параметра m , представлен на рис. 6, 7.

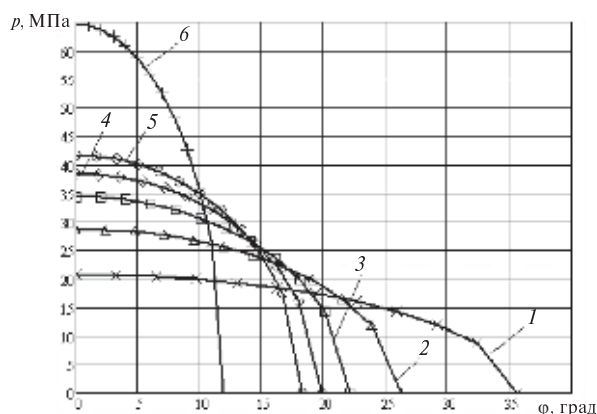


Рис. 6. Контактные параметры напряженного состояния для сочетания сталь — сталь, рассчитанные аналитически по формуле (7)

Кривая 1 соответствует контактному давлению (напряжению) при $m = 1,45$; 2 — $m = 1,77$; 3 — $m = 2,09$; 4 — $m = 2,41$; 5 — $m = 2,72$; 6 — $m = \infty$.

С целью сравнительной оценки двух методов изучения влияния конечных размеров полового цилиндра на значения контактных параметров на рис. 8, 9 представлены параметры напряженного состояния, а именно полуугол контакта и максимальное контактное давление (напряжение) в зависимости от параметра m . На рис. 8, а для сочетания сталь — сталь, на рис. 8, б — сталь — бронза. Параметры с индексом 1 рассчитаны с помощью МКЭ, с индексом 2 — аналитически по формулам (6), (9).

Из рис. 8, 9 видно, что контактные параметры напряженного состояния по данной расчетной схеме напрямую зависят от параметра m : чем меньше m , тем больше угол контакта и меньше максимальное контактное давление (напряжение), что связано с увеличением окружных деформаций в наружном теле. Необходимо отметить, что использование формул (6), (9) возможно не при любых m , как это утверждают в [3].

В статье не сформулированы рекомендации для использования их в заводской практике, хотя конструктор найдет в приведенных данных возможность сделать полезные выводы. Дело в том, что реализовать эти выводы можно только с согласия Ростехнадзора, правила которого исключают наличие пластических деформаций. Чтобы повлиять на существующую практику, необходимы рекомендации более широкого плана, опирающиеся на решения ряда вопросов, далеко выходящих за рамки данной статьи.

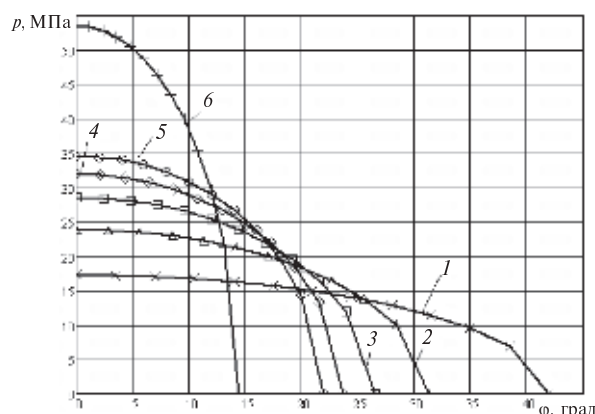


Рис. 7. Контактные параметры напряженного состояния для сочетания сталь — бронза, рассчитанные аналитически по формуле (7)

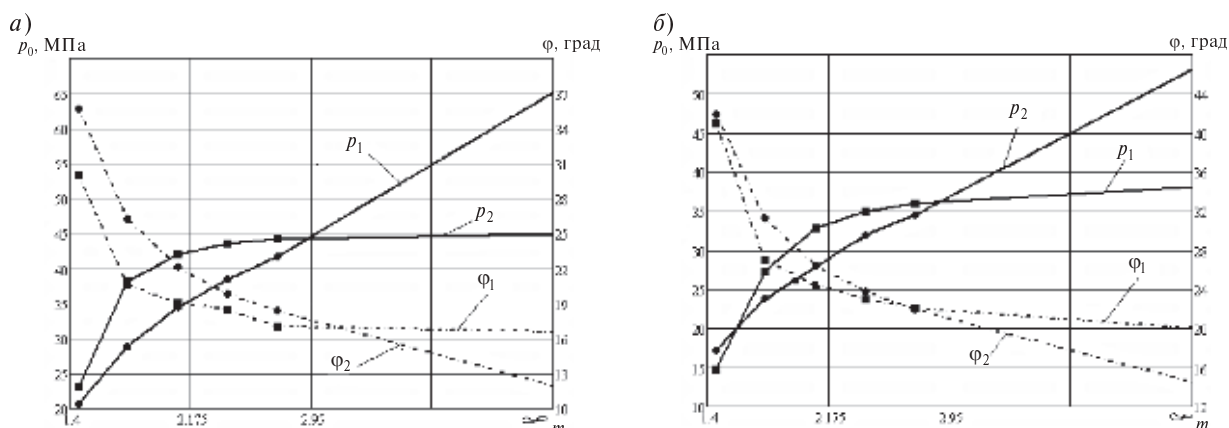


Рис. 8. Влияние конечных размеров полого цилиндра на контактные параметры для сочетаний сталь — сталь (а) и сталь — бронза (б)

Выводы по работе сводятся к следующему:

1. Использование формул (4), (5), полученных в случае неограниченной плоскости, т. е. при $m = \infty$, для определения контактных параметров напряженного состояния при конечности размера B дает завышенные результаты максимального контактного давления и заниженные результаты контактного угла.

2. Применение формул (6), (7), (9) для определения контактных параметров при решении контактных задач на неограниченной плоскости недопустимо.

3. Результаты моделирования подтверждают предположение о характере распределения контактного давления (напряжения) по эллиптическому закону.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штаерман, И.Я. Контактная задача теории упругости [Текст] / И.Я. Штаерман.— М.: Гостехиздат, 1949.— 124 с.
2. Милов, А.Б. О вычислении контактной жесткости цилиндрических соединений [Текст] / А.Б. Милов.— Проблемы прочности.— 1973. №1.
3. Сороковенко, Ф.Ф. Грузовые проушины [Текст]: автореф. дисс. ... к. т. н.— Харьков, 1967.— 24 с.
4. Соколов, С.А. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин [Текст] / С.А. Соколов.— СПб.: Политехника, 2005.— 424 с.

УДК 669.295.5

Г.В. Цветкова, М.А. Скотникова, Ю.М. Белов,
Н.А. Крылов, Е.К. Иванов

СТРУКТУРНОЕ И ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЯ НАПЛАВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК СМЕСИТЕЛЕЙ

Сегодня доказано, что большинство отказов машин и механизмов происходит из-за износа их деталей и узлов. Для увеличения срока службы деталей машин используют различные способы поверхностного упрочнения, например наплавки, нашедшие широкое применение

в производстве разнообразных изделий, в частности рабочих лопаток смесителей.

В процессе дробления, гранулирования, приготовления различных асфальтобетонных и битумоминеральных смесей происходит интенсивное абразивное изнашивание рабочих лопаток

смесителей, срок службы которых составляет менее двух месяцев (другие детали смесителей приходится менять в три раза реже), что снижает технико-экономические показатели производства [1, 2].

Согласно классификации международного института сварки применение наплавов из износостойких хромистых сталей системы Fe—C—Cr—Mn—Si—Ni—W—Mo с повышенным содержанием углерода — один из весьма эффективных способов повышения сопротивления абразивному изнашиванию на рабочих лопатках смесителей [3–5]. Наибольшую стойкость в условиях абразивного изнашивания имеют наплавки с карбидным упрочнением. Однако существенным недостатком высоколегированных наплавочных материалов является снижение их вязко-пластических и прочностных свойств из-за наличия избыточной карбидной фазы и появления трещин как в самом процессе наплавки, так и при последующей эксплуатации детали [6–9].

Результаты механических испытаний металла лопаток

Материалом для исследования были приняты 8 опытных износостойких наплавов с аустенитно-мартенситной структурой при различном количестве упрочняющих фаз. Они наносились на сталь 45 с помощью электродов типа УОНИ-13 под опытными флюсами с 8-ю различными химическими составами системы Fe—C—Cr—Nb—Mo—V—B—Si—Mn (табл. 1).

Из полученных наплавов изготавливали стандартные образцы для испытаний на абра-

зивное изнашивание. Критерием оценки износостойкости ϵ было принято отношение весового износа эталона (сталь 45) по отношению к испытываемому образцу.

Износостойкость восьми наплавленных материалов изменялась в широком интервале — от 0,63 до 5,89. Полученные структуры имели размер зерен $D_3 = 10–50$ мкм при твердости металла, достигающей 26–61 HRC и 3600–12500 H_{50} . В табл. 2 и на рис. 1 наплавки расположены в порядке возрастания их относительной износостойкости ϵ , которая сравнивалась с твердостью (H_{50} , HRC) и размером зерна D_3 .

Наблюдалось немонокотное, ступенчатое возрастание сопротивления изнашиванию образцов наплавов 1, 4, 7, 3 (I ступень), 6, 5, 2 (II ступень), 8 (III ступень).

Рентгеноструктурные исследования наплавочных материалов

При проведении наплавочных работ все легирующие элементы с различными коэффициентами перехода попадали в наплавленный металл, что определяло его фазовый и химический состав, структуру и свойства. Идентификацию фазового состава наплавов проводили с помощью рентгеноструктурного анализа на дифрактометре «Rotaflex» с использованием картотеки JCPDS и персональной ЭВМ.

Во всех исследованных наплавках системы Fe—C—Cr—Nb—Mo—V—B—Si—Mn основными фазовыми составляющими были мартенсит и остаточный аустенит (табл. 3). Кроме того, присутствовали упрочняющие фазы в виде боридов

Таблица 1

Химический состав исследованных материалов наплавов

Название легирующего элемента	Содержание легирующего элемента в наплавке							
	1	2	3	4	5	6	7	8
C	0,8	1,8	0,9	1,7	0,8	1,5	0,8	1,6
Si	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Mn	0,7	0,8	0,9	0,7	0,5	0,8	0,7	0,9
Cr	7,1	6,7	6,6	6,3	10,0	10,4	9,6	10,3
Nb	2,0	0,5	2,2	0,4	0,5	1,8	0,4	2,4
Mo	7,8	4,4	4,4	7,3	7,6	4,5	4,3	7,7
V	2,7	2,6	1,1	1,0	1,2	1,1	1,6	2,7
B	0,05	0,25	0,25	0,05	0,25	0,05	0,05	0,32
Σ ЛЭ	21,8	17,5	16,8	18,1	21,3	20,8	18,1	26,3

Таблица 2

Твердость наплавленного металла

Номер наплавки	Свойства исследованных наплавов			
	Размер зерна, D_3 , мкм	Макротвердость HRC	Микротвердость H_{50}	Относительная износостойкость ϵ
1	16	27,5	3600	0,63
4	50	50	10640	1,18
7	50	47	12140	1,43
3	30	60	8440	1,88
6	40	33,5	7450	3,3
5	30	55	12500	3,44
2	15	58	7740	3,66
8	10	61	7540	5,89

(CrB₂, CrB), карбидов (NbC, V₂C, Cr₂C, Fe₂C, Cr₇C₃, Cr₂₃C₆), карбоборида (Cr₇BC₄) и интерметаллида (FeV) в зависимости от соотношения содержания карбидообразующих легирующих элементов и углерода.

Полученные структуры восьми наплавов содержали 10–62 % аустенита, 29–85 % мартенсита и 1–30 % упрочняющих фаз. На рис. 2, 3 и в табл. 3 наплавки даны в порядке возрастания их относительной износостойкости ϵ , которая сравнивалась с размером зерна D_3 , количеством мартенситной (М), аустенитной (А) и упрочняющих (К) фаз.

Как видно из рис. 2, относительная износостойкость наплавов возрастала по мере уменьшения размера первичных аустенитных зерен (D_3), что обеспечивало зернограницное упрочнение наплавочных материалов.

Относительная износостойкость наплавочных материалов возрастала по мере уменьшения количества мартенсита, а также увеличения содержания аустенита и упрочняющих фаз (рис. 3). Однако видно, что только оптимальное соотношение количества мартенситной, аустенитной и упрочняющих фаз обеспечивает максимальную износостойкость наплавочных материалов — она наблюдается при относительно равном их соотношении (рис. 3).

Рис. 3 демонстрирует: относительная износостойкость наплавочных материалов возрастала по мере возрастания содержания количества упрочняющих фаз, что обеспечивало **дисперсионное упрочнение** наплавочных материалов.

Таким образом, показано, что износостойкость наплавочных материалов растет за счет возрастания твердорастворного, дисперсионно-

го и зернограницного упрочнения материала, т. е. за счет большей суммарной концентрации карбидообразующих легирующих элементов в твердом растворе, увеличения количества карбидов и карбидосодержащих фаз и усиления прочностных и вязко-пластических свойств благодаря уменьшению размера зерен.

Установлено оптимальное структурно-фазовое состояние наплавочных материалов. Содержание в наплавочном материале мартенсита 30–40 %, аустенита 35–40 % и упрочняющих фаз

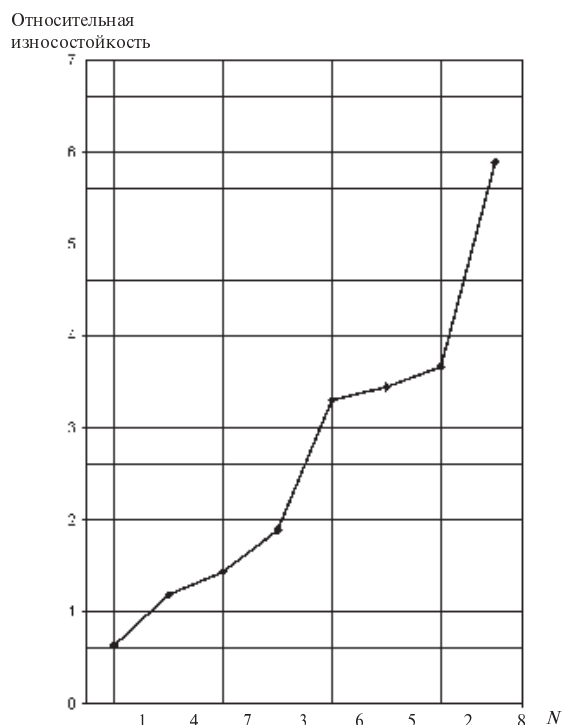


Рис. 1. Износостойкость исследованных наплавов (N — номер наплавки)

Таблица 3

Фазовый состав исследованных наплавочных материалов

Номер наплавки	Фазовый состав исследованных наплавов				
	Содержание аустенита А, %	Содержание упрочняющей фазы К, %	Карбиды, интерметаллиды	Карбобориды	Бориды
1	10	5	NbC; V ₂ C	Cr ₇ BC ₄	—
4	23	1,4	—	Cr ₇ BC ₄	—
7	20	1,1	—	Cr ₇ BC ₄	—
3	26	16	NbC	—	CrB ₂
6	62	9	NbC; Fe ₂ C; (Cr, Fe) ₇ C ₃	—	—
5	48	23	NbC; Cr ₂ C	—	CrB; CrB ₂
2	47	6	V ₂ C; Fe ₂ C; (Cr, Fe) ₇ C ₃	—	—
8	38	30	NbC; V ₂ C; Cr ₂₃ C ₆ ; (Cr, Fe, Mo) ₇ C ₃ ; FeV	—	CrB; CrB ₂

Относительная износостойкость

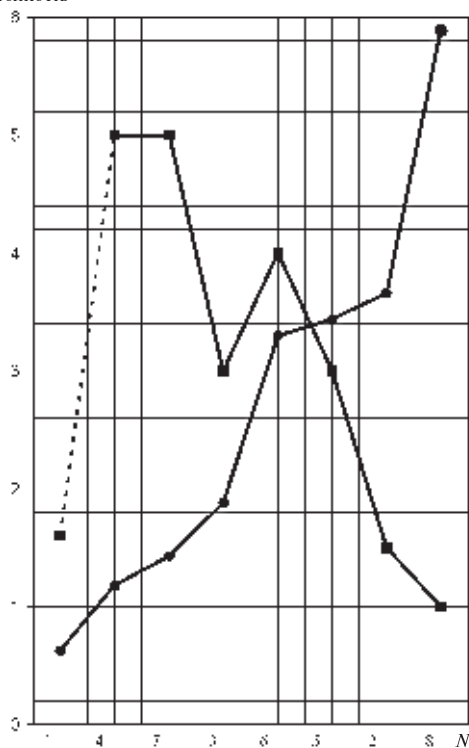


Рис. 2. Размер зерна исследованных наплавов по мере возрастания их износостойкости (N — номер наплавки):
 —■— износостойкость;
 —●— диаметр зерна D₃, мкм

Относительная износостойкость

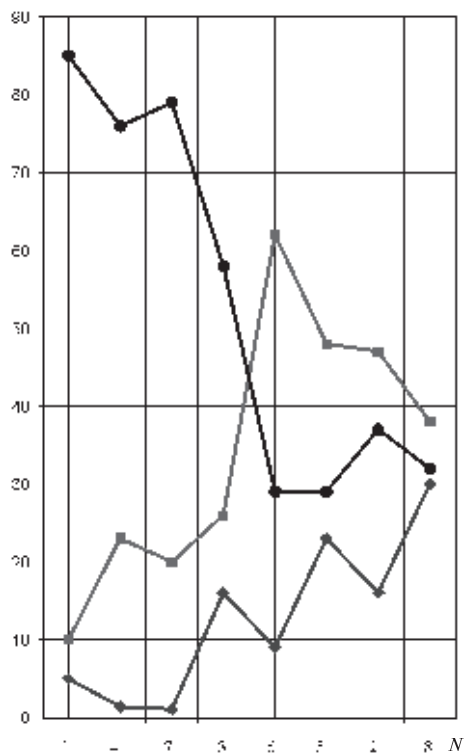


Рис. 3. Количество мартенсита (М), аустенита (А) и упрочняющих фаз (К) исследованных наплавов по мере возрастания их износостойкости (N — номер наплавки):
 —■— А, %; —●— К, %; —▲— М, %



25–30 % обеспечивало закрепление максимального количества частиц упрочняющих фаз; при этом достигались максимальная относительная износостойкость $\varepsilon = 5,89$ и твердость $HRC\ 61$ наплавочных материалов.

Металлографические исследования наплавочных материалов

Для исследования и оптимизации морфологии распределения карбидов и карбидосодержащих фаз вдоль границ и в теле зерен по мере увеличения износостойкости наплавочных материалов проводили исследования на просвечивающем электронном микроскопе ЭМ-200 методом одноступенчатых угольных реплик и на оптическом микроскопе ММР-4.

Каждая из обнаруженных фаз имела свои морфологические признаки: карбид NbC во всех сплавах (образцы наплавки 1, 3, 6, 5, 8) входил в состав эвтектики (аустенит + NbC), располагающейся обычно вдоль границ зерен (рис. 2, а).

Карбиды хрома $(Cr, Fe)_7C_3$ прямоугольной неправильной формы (образцы 6, 8; рис. 2, б) и карбобориды Cr_7B_4C (образцы 1, 4, 7; рис. 2, в) располагались в аустенитной составляющей, которая формировалась в виде окантовки зерен со структурой мартенсита.

Мелкие трудно растворимые частицы фазы внедрения карбида V_2C округлой формы (в наплавках 1, 2, 8) выделялись, как правило, внут-

ри зерен и обеспечивали измельчение первичных зерен аустенита (рис. 2, г).

Частицы боридов CrB и CrB_2 располагались вдоль границ зерен и вблизи эвтектики аустенит + NbC (в наплавках 3, 5, 8; рис. 2, д).

Трудно обнаруживаемые когерентные ε -карбиды Fe_2C наблюдались в мартенситной структуре в виде высокодисперсных частиц (в наплавках 6, 2; рис. 2, е).

Оказалось, что по мере увеличения износостойкости ε наплавки в теле зерен и особенно по их границам растет число вторичных фаз, увеличивается их размер, усложняется конфигурация.

Образцы наплавки 1 обладали самой низкой износостойкостью ($\varepsilon = 0,63$). В их феррито-карбидной структуре практически отсутствовала аустенитная составляющая, и мелкие округлые частицы фаз легко выкрашивались из мартенситной основы при абразивном изнашивании, снижая тем самым работоспособность материала.

В структуре образцов наплавки 4, 7, 3, соответствующих I ступени повышения износостойкости ($\varepsilon = 1,18–1,88$), по границам мартенситных зерен образовывались островки аустенитной или аустенитно-ледебуритной составляющей, в которой надежно заклинивались и поэтому не выкрашивались, а истирались крупные частицы Cr_7B_4C и CrB_2 .

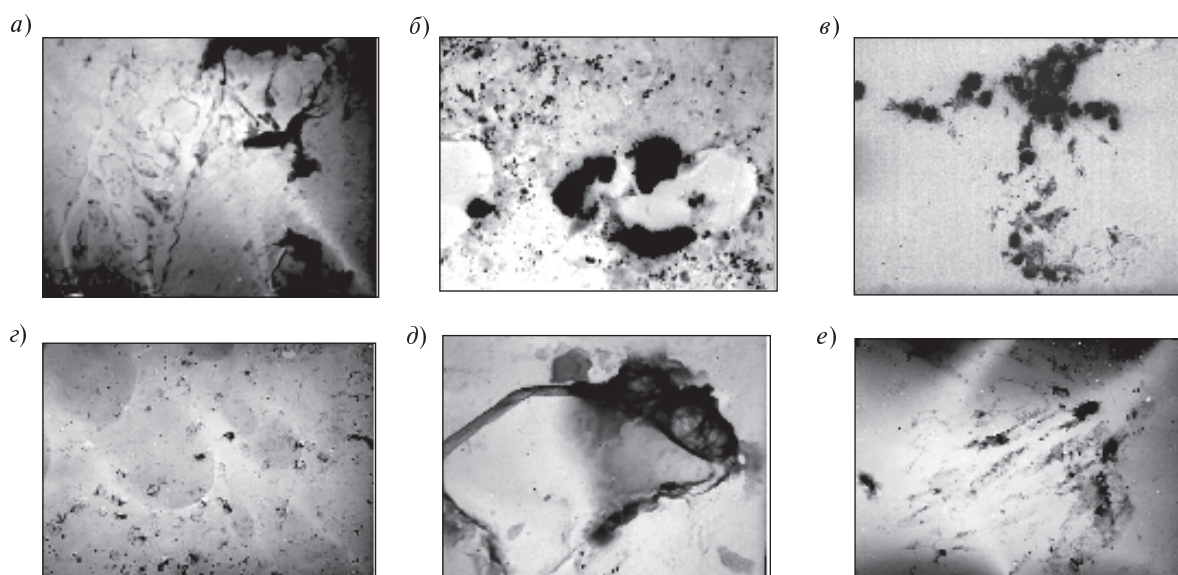


Рис. 5. Электронно-микроскопические изображения упрочняющих фаз в исследованных наплавках: 3 — NbC (а), 2 — $(Cr, Fe)_7C_3$ (б), 7 — Cr_7B_4C (в), 1 — V_2C (г), 3 — CrB (д), 6 — Fe_2C (е); $\times 9000$

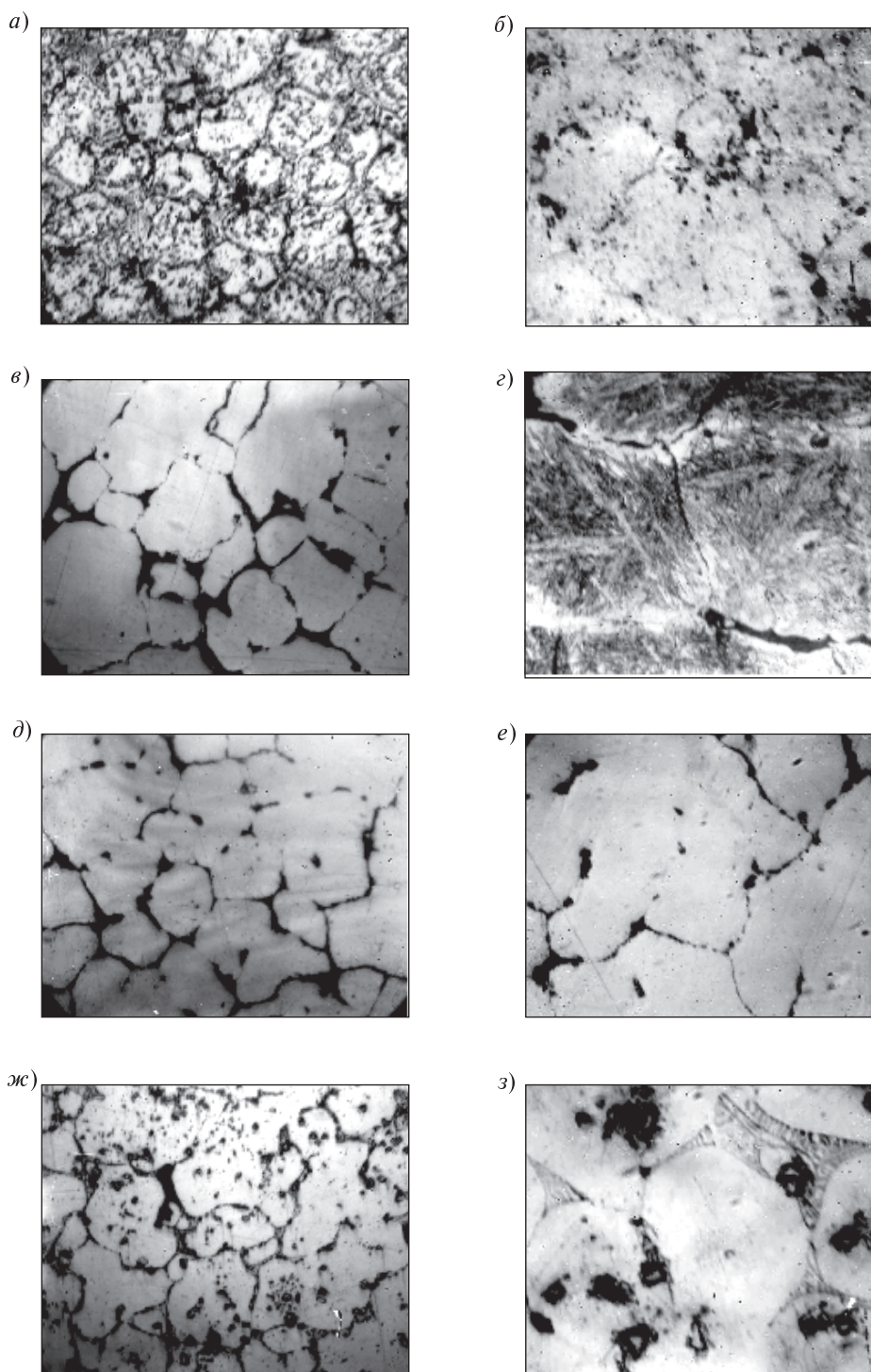


Рис. 6. Структура исследованных наплавов:
1 — а, б, 4 — в, г, 7 — д, е, 3 — ж, з по мере возрастания их износостойкости:
×100 (а, в, д, ж); ×1000 (б, г, е, з)

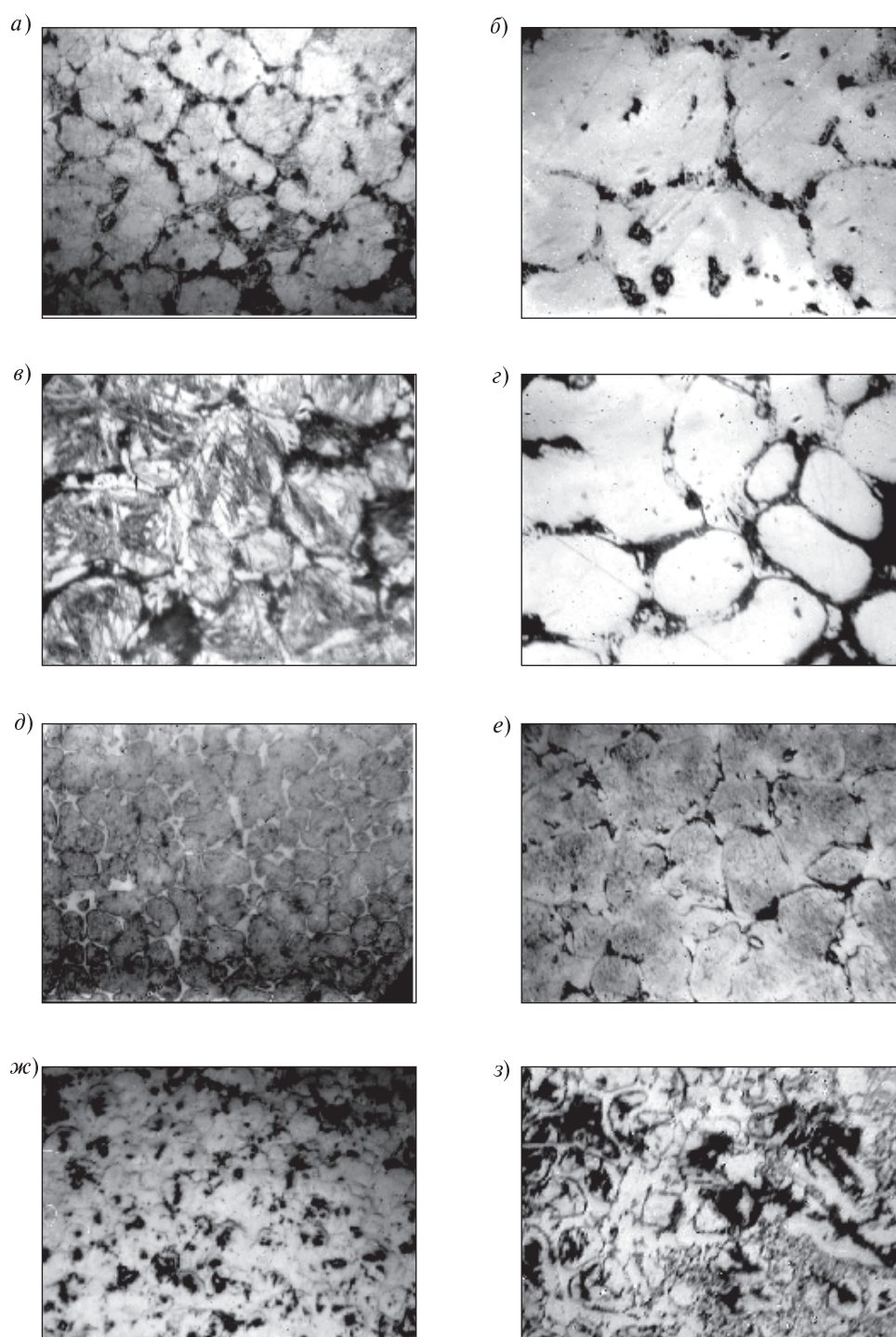


Рис. 7. Структура исследованных наплавов:
6 — а, б, 5 — в, г, 2 — д, е, 8 — ж, з) по мере возрастания их износостойкости;
×100 (а, в, д, ж); и ×1000 б, г, е, з

У образцов наплавов 6, 5, 2, соответствующих II ступени повышения износостойкости ($\varepsilon = 3,30-3,66$), сформировалась качественно новая структура. По границам твердых зерен с мартенситно-карбидной структурой ($M + Me_2C$) появилась сплошная окантовка из мягкого остаточного аустенита, который, обладая высокими вязко-пластическими свойствами, прочно удерживал твердые частицы $(Cr, Fe)_7C_3$ и NbC , в результате чего наплавки имели высокую износостойкость.

Следует также отметить, что при трении по абразиву аустенит может полностью или частично претерпевать превращение в мартенсит, что должно приводить к дополнительному повышению износостойкости наплавленного материала.

Образцы наплавки 8, соответствующей III ступени повышения износостойкости ($\varepsilon = 5,89$), имели структуру с мелкими зернами, окантованными аустенитно-ледебуритной составляющей с большим количеством карбидов, боридов, карбоборидов и интерметаллидов, обеспечивающих наибольшее сопротивление абразивному изнашиванию.

Таким образом, впервые показано, что износостойкость наплавочных материалов повышается не только с увеличением общего количества,

твердости и размеров частиц упрочняющих фаз, но и благодаря формированию оптимальной морфологии распределения карбидов и карбидоудержающих фаз вдоль границ и в теле зерен.

Показано, что оптимальными свойствами обладает структура из твердых мартенситных зерен (диаметр 10–15 мкм), упрочненных дисперсными карбидами типа Me_2C и окантованных мягкой аустенитно-ледебуритной оторочкой.

Большинство высокопрочных карбидов и боридов хрома, ниобия и ванадия располагаются в мягкой оторочке и не выкрашиваются.

На основании проведенных исследований была разработана схема структурно-фазового состояния всех наплавочных материалов по мере возрастания их износостойкости в зависимости от размера зерен, количества основных и вторичных фаз, а так же от морфологии их распределения (рис. 8).

Таким образом, установлено, что износостойкость наплавов определяется комплексом факторов: прочностью матрицы; твердостью, конфигурацией и распределением упрочняющих фаз; прочностью сцепления матрицы с частицами. Наиболее высокое сопротивление изнашиванию

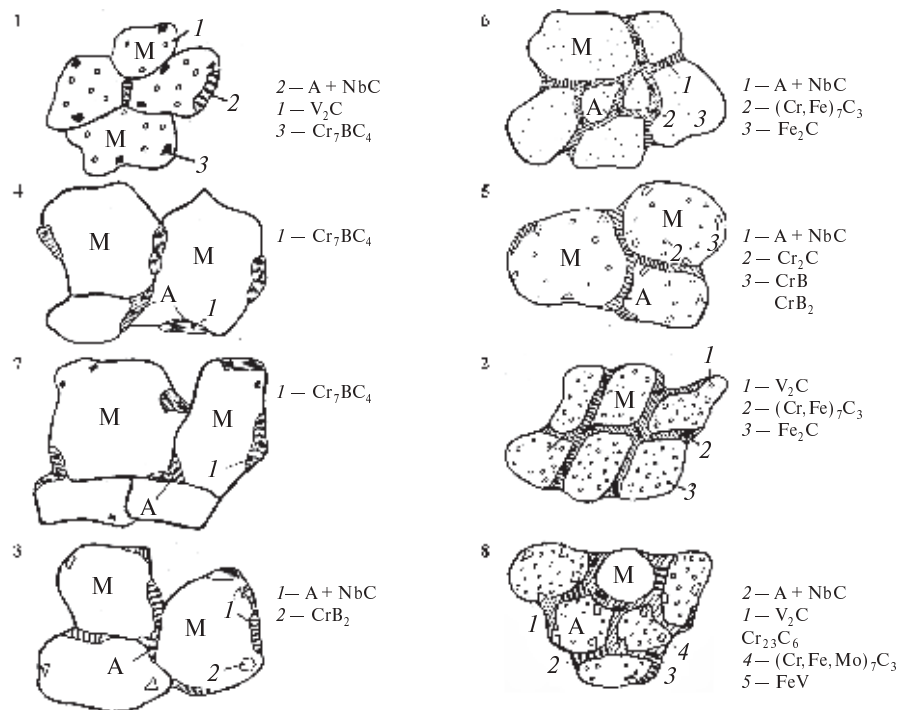


Рис. 8. Схемы структурно-фазового состояния исследованных наплавов (цифры — номера наплавов)



достигается при определенном количественном и качественном структурно-фазовом состоянии наплавов, когда измельченные зерна с мартенситной структурой, упрочненные дисперсными карбидами типа Me_2C , окантованы пластичной

аустенитной или аустенитно-ледебуритной карбидосодержащей фазой. При этом максимальная износостойкость достигается при относительно равном соотношении количества мартенситной, аустенитной и упрочняющих фаз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гордиенко, В.Н.** Износостойкие материалы для защиты лопаток асфальтосмесителей [Текст] / В.Н. Гордиенко, С.Н. Попов // Строительные и дорожные машины.— 1988, № 8.— С. 18.
2. **Новиков, А.Н.** Асфальтосмесительные установки [Текст] / А.Н. Новиков.— М.: Высш. школа, 1987.— 207 с.
3. **А. с. СССР.** Материал для наплавки [Текст] Ю.М. Белов, В.А. Красавчиков [и др.].— № 428886 от 23.01.74.
4. **А. с. СССР.** Сталь [Текст] / Ю.М. Белов, В.А. Малышевский.— № 241686 от 03.02.69.
5. **А. с. СССР.** Состав износостойкого материала [Текст] / Ю.М. Белов, Л.М. Виторский [и др.].— № 1448557 от 12.05.87.
6. **Скотникова, М.А.** Механические свойства

и структура наплавленного износостойкого металла [Текст] / М.А. Скотникова, Ю.М. Белов, Л.Ф. Сокирянский, Г.В. Цветкова // Металловедение и термическая обработка металлов.— 1994. № 8.— С. 20–23.

7. **Лившиц, Л.С.** Основы легирования наплавленного металла. Абразивный износ [Текст] / Л.С. Лившиц, Н.А. Гринберг, Э.Г. Куркумелли.— М.: Машиностроение, 1969.— 186 с.

8. **Хрущов, М.М.** Износостойкость и структура твердых наплавов [Текст] / М.М. Хрущов, М.А. Бабичев, С.П. Козырев, Л.Б. Крапошина, Л.Ю. Пружанский.— М.: Машиностроение, 1971.— 93 с.

9. **Рыбакова, Л.М.** Структура и износостойкость металла [Текст] / Л.М. Рыбакова, Л.И. Куксенова.— М.: Машиностроение, 1982.— 128 с.

УДК 624.078.45

А.Ю. Шлепетинский, К.П. Манжула

КОЭФФИЦИЕНТЫ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ В КРЕСТОВОМ СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ С НЕПРОВАРОМ

В сварных элементах металлоконструкций различных машин и сооружений часто наблюдаются конструктивные или технологические непровары. Согласно стандартами на сварку толщина таких непроваров варьируется от 0 до 2 мм. При толщине более 0,5 мм непровар на концах имеет закругления, в районе которых при действии нагрузки возникает напряженно-деформированное состояние (НДС), которое может быть оценено с помощью коэффициентов концентрации и градиентов напряжений и деформаций. В случае, когда зазор менее 0,5 мм, непровар можно рассматривать как готовую трещину и оценивать НДС в вершине непровара через коэффициенты интенсивности напряжений (КИН).

В статье рассматривается трещиноподобный непровар, который моделируется математическим разрезом, т. е. расстояние между берегами

непровара равно нулю. Исследовалась плоская модель крестового сварного соединения, нагруженного растягивающей распределенной силой (рис. 1, а). Расчетная модель строится в среде конечно-элементного моделирования Ansys v11.0. В окрестности вершины трещины размещались два слоя сингулярных элементов. Радиус первого из них составлял 0,01 мм (рис. 1, б). В радиусе 0,4 мм вокруг вершины трещины размер треугольных конечных элементов также не превышал 0,01 мм; остальная часть модели разбивалась на элементы не более 1 мм.

Моделирование роста трещины проводилось дискретно шагами размером 0,1–1,0 мм. Размер шага ограничивался размером пластической зоны в направлении развития трещины от вершины. При этом решалась задача в упругой постановке, а размер пластической зоны контроли-

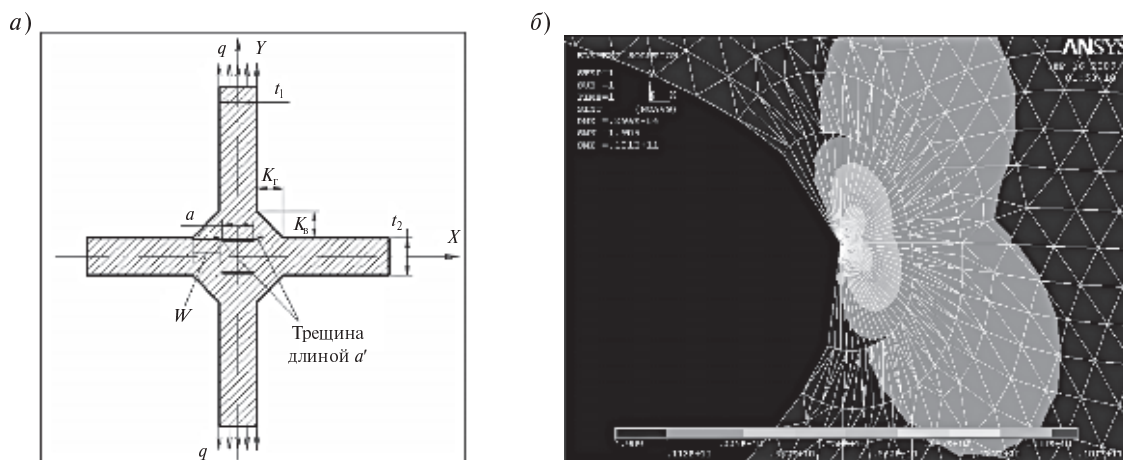


Рис. 1. Расчетная модель крестового сварного соединения (а) и вершина трещины в деформированном состоянии (б)

ровался достижением предела текучести для стали 09Г2С $\sigma_T = 350$ МПа. В расчете задавалось постоянное значение растягивающей нагрузки. На каждом шаге определялись коэффициенты интенсивности напряжений K_I и K_{II} с помощью команды KALC и угол, в направлении которого будет расти трещина, — из условия перпендикулярности к максимальным нормальным растягивающим напряжениям [1]. На каждом шаге модель перестраивалась с учетом приращения длины трещины. Итог такого поэтапного моделирования — функция зависимости коэффициента интенсивности напряжений K_I от относительной длины трещины при определенных геометрических параметрах и значениях нагрузки, принятых в данном численном моделировании:

$$K_I = f(a'/w), \quad (1)$$

где a' — длина приращения трещины;

$w = \frac{t_1 - a}{2} + K_r$ — расстояние от вершины не-

провара до границы катета шва в направлении горизонтальной оси x (наибольшая возможная длина трещины). Для случаев различного исполнения углового шва w определяется как расстояние от вершины непровара до пересечения границы основного свариваемого листа с касательной к шву, проведенной параллельно линии, соединяющей вершины катетов (рис. 2, а, б), или как расстояние от вершины непровара до прямой, соединяющей вершины катетов шва (рис. 2, в).

Для оценки влияния геометрии крестового сварного соединения с непроваром на изменение КИН определялись наиболее значимые геометрические параметры соединения из диапазона их варьирования, наиболее характерного для металлоконструкций транспортных машин, судов, строительных конструкций (табл. 1). Каждому параметру присваивалось кодированное значение x таким образом, чтобы оно принимало

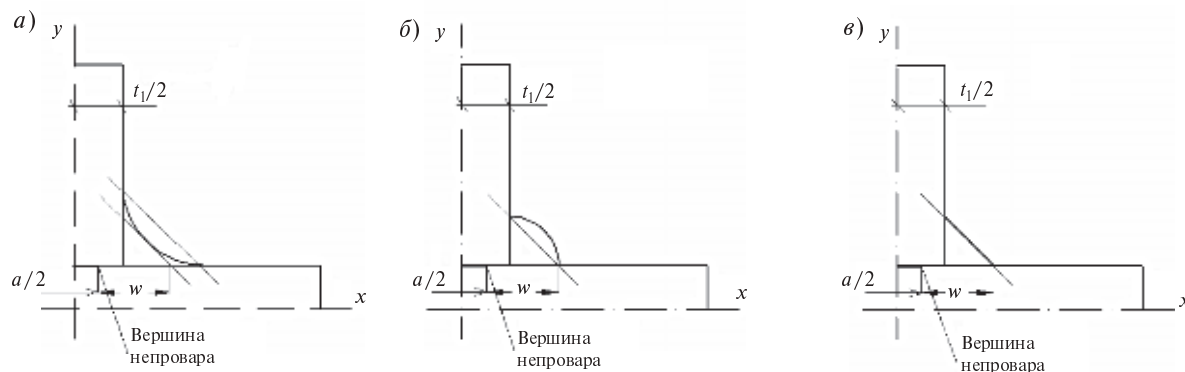


Рис. 2. Определение величины w при различных вариантах исполнения шва

Таблица 1

Рассматриваемые значения геометрических параметров сварного соединения

Параметр	Кодированное значение	Рассматриваемые значения параметра			
		Базовое	Интервал варьирования	Нижний предел (–)	Верхний предел (+)
K_B/t_1	$x_1 = 3,33 \frac{K_B}{t_1} - 2,33$	0,7	0,3	0,4	1,0
a/t_1	$x_2 = 3,33 \frac{a}{t_1} - 2,33$	0,7	0,3	0,4	1,0
K_I/K_B	$x_3 = 5 \frac{K_I}{K_B} - 4$	0,8	0,2	0,6	1,0
t_2 , мм	$x_4 = 0,067t_2 - 1,67$	25	15	10	40
t_1/t_2	$x_5 = 3,33 \frac{t_1}{t_2} - 2,33$	0,7	0,3	0,4	1,0

значения –1 и +1 соответственно при нижнем и верхнем пределе значений параметра (второй столбец табл. 1).

Обозначения геометрических параметров представлены на рис. 1, а. По методике планирования многофакторного эксперимента [2] был составлен план (табл. 2), предусматривающий проведение серии из 32 опытов (минимальное число опытов определяется как 2^n , где 2 — число варьирований кодированного значения (–1 и +1), n — число параметров), позволяющих учитывать влияние каждого параметра, а также их совместное действие.

В табл. 2 знаки – и + обозначают принимаемые в каждом опыте соответственно нижний или верхний пределы рассматриваемых значений параметров; к примеру, кодированное значение $x_2 = -1$ говорит о том, что в этом опыте параметр $a/t_1 = 0,4$.

Итог каждого такого опыта — таблица значений угла, координат вершины трещины, K_I и K_{II} на каждом дискретном шаге развития трещины, а также зависимость (1).

В качестве примера в табл. 3 приведены результаты моделирования 24-го опыта из плана многофакторного эксперимента (табл. 2).

Таблица 2

Матрица планирования многофакторного эксперимента

№ опыта	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	№ опыта	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	–	–	–	–	–	17	–	–	–	–	+
2	+	–	–	–	–	18	+	–	–	–	+
3	–	+	–	–	–	19	–	+	–	–	+
4	+	+	–	–	–	20	+	+	–	–	+
5	–	–	+	–	–	21	–	–	+	–	+
6	+	–	+	–	–	22	+	–	+	–	+
7	–	+	+	–	–	23	–	+	+	–	+
8	+	+	+	–	–	24	+	+	+	–	+
9	–	–	–	+	–	25	–	–	–	+	+
10	+	–	–	+	–	26	+	–	–	+	+
11	–	+	–	+	–	27	–	+	–	+	+

Окончание табл. 2

№ опыта	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	№ опыта	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
12	+	+	—	+	—	28	+	+	—	+	+
13	—	—	+	+	—	29	—	—	+	+	+
14	+	—	+	+	—	30	+	—	+	+	+
15	—	+	+	+	—	31	—	+	+	+	+
16	+	+	+	+	—	32	+	+	+	+	+

Аппроксимация результата по K_I и относительной длине трещины a'/w проводилась с помощью программы Advanced Grapher. Наилучшее соответствие имеет полиномиальный тип регрессии, причем, чем больше показатель полинома, тем точнее формула, описывающая зависимость $K_I = f(a'/w)$. Оценка величины соответствия также проводилась по этой программе при помощи расчета стандарта отклонения. В табл. 3 приведены два варианта полиномиальной аппроксимации 4-й и 2-й степени и соответствующие им значе-

ния стандартов отклонений (0,136 и 0,879). Для единообразия зависимости (1) при условии сохранения уровня точности (стандарт отклонения не выше 0,5) в качестве аппроксимирующей функции для всех опытов принят полином 4-й степени.

Итогом проведения 32 серий моделирования стала функция вида

$$K_I = f' \left(\frac{K_B}{t_1}, \frac{a}{t_1}, \frac{K_T}{K_B}, t_2, \frac{t_1}{t_2} \right) f'' \left(\frac{a'}{w} \right), \quad (2)$$

Таблица 3

Результаты моделирования развития трещины с геометрией соединения, соответствующей опыту № 24* в табл. 2, и при растягивающей нагрузке $q = 100$ МПа

Шаг трещины	Угол приращения трещины от оси x , θ°	Координаты вершины трещины, мм		K_I , МПа· $\sqrt{м}$	K_{II} , МПа· $\sqrt{м}$	Длина трещины a' , мм	Относительная длина трещины a'/w
		x	y				
Исходный непровар	0	5	5	8,078	1,175	0	0
1	17,807	5,571	5,183	8,843	1,784	0,6	0,06
2	8,298	6,165	5,27	9,921	1,419	1,2	0,12
3	9,573	6,757	5,37	10,878	1,636	1,8	0,18
4	9,175	7,35	5,466	11,955	1,792	2,4	0,24
5	9,403	7,942	5,564	13,122	2,018	3	0,3
6	9,608	8,534	5,664	14,445	2,321	3,6	0,36
7	10,217	9,124	5,77	15,963	2,713	4,2	0,42
8	10,794	9,713	5,882	17,729	3,207	4,8	0,48
9	11,446	10,301	6,001	19,899	3,850	5,4	0,54
10	12,277	10,887	6,129	22,630	4,788	6	0,6
11	13,549	11,47	6,27	26,414	6,126	6,6	0,66
12	14,689	12,05	6,422	32,358	8,287	7,2	0,72
Полученные зависимости $K_I = f(a'/w)$: полином 4-й степени $8,144 + 7,385(a'/w) + 70,839(a'/w)^2 - 186,586(a'/w) + 192,221(a'/w)^4$ (стандартное отклонение — 0,136); полином 2-й степени $9,007 - 1,278(a'/w) + 43,215(a'/w)^2$ (стандартное отклонение — 0,879)							

* Шифр $K_B/t_1 = 1,0$; $a/t_1 = 1,0$; $K_T/K_B = 1,0$; $t_2 = 10$ мм; $t_1/t_2 = 1,0$ мм; $w = 10$ мм.



которая учитывает влияние наиболее важных геометрических характеристик крестового сварного соединения на развитие трещины от непровара.

В соответствии с используемой методикой многофакторного эксперимента уравнение (2) с пятью варьируемыми факторами представляется уравнением регрессии вида

$$K_I = b_0 + \sum_{i=1}^5 b_i x_i + \sum_{\substack{i=1 \\ j>i}}^5 b_{ij} x_i x_j + \\ + \sum_{\substack{i=1 \\ j>i \\ k>j}}^5 b_{ijk} x_i x_j x_k + \sum_{\substack{i=1 \\ j>i \\ k>j \\ m>k}}^5 b_{ijkm} x_i x_j x_k x_m + \\ + b_{12345} x_1 x_2 x_3 x_4 x_5, \quad (3)$$

где b_0 , b_i , b_{ij} , b_{ijk} , b_{ijkm} , b_{12345} — коэффициенты уравнения регрессии, определяемые далее; x — кодированное значение параметра; i, j, k, m — индексы, определяющие то, какой именно параметр учитывается, при этом i принимает значения от 1

до 5, j — от 2 до 5, k — от 3 до 5, m — 4 и 5. К примеру, обозначение коэффициента b_{245} говорит о том, что этот коэффициент учитывает влияние совместного действия трех параметров — относительной длины начального непровара a/t_1 , толщины основного листа t_2 и отношения толщин привариваемого и основного листов t_1/t_2 .

Коэффициенты уравнения (3) представляют собой полиномы от относительной величины приращения трещины, и в общем виде их можно записать так:

$$b_p = \beta_{0p} + \beta_{1p} \left(\frac{a'}{w} \right) + \beta_{2p} \left(\frac{a'}{w} \right)^2 + \\ + \beta_{3p} \left(\frac{a'}{w} \right)^3 + \beta_{4p} \left(\frac{a'}{w} \right)^4, \quad (4)$$

где β_{qp} ($q = 0, 1, \dots, 4$) — коэффициент перед соответствующей степенью множителя (a'/w) , определяемый по табл. 4; $p = 0, 1, 2, \dots, 5, 12, \dots, 12345$ — индекс, указывающий на соответствующий параметр или группу параметров.

Таблица 4

Значения коэффициентов уравнения (4)

Обозначение коэффициента регрессии	Коэффициенты уравнения				
	β_0	β_1	β_2	β_3	β
b_0	10,89	11,06	54,03	−136,15	155,96
b_1	−2,56	−0,04	−9,67	17,76	−25,59
b_2	3,40	−0,98	8,15	−15,28	18,22
b_3	−0,33	1,79	6,76	−24,03	37,66
b_4	3,62	4,91	8,22	−21,15	34,29
b_5	2,69	1,89	25,74	−64,90	56,18
b_{12}	−1,37	−1,46	2,91	−6,26	1,97
b_{13}	0,02	0,39	−3,94	9,29	−12,73
b_{14}	−0,86	−0,12	−3,90	8,41	−12,95
b_{15}	−0,63	1,27	−14,28	38,71	−31,89
b_{23}	−0,25	−0,39	6,04	−17,63	15,06
b_{24}	1,13	−0,26	1,36	0,61	−2,91
b_{25}	0,67	0,59	−3,28	7,70	0,32
b_{34}	−0,12	0,70	1,98	−6,67	12,94
b_{35}	−0,09	0,67	2,09	−8,48	7,03
b_{45}	0,90	2,05	−4,90	15,58	−14,66
b_{123}	0,07	0,12	−2,25	7,54	−4,44

Окончание табл. 4

Обозначение коэффициента регрессии	Коэффициенты уравнения				
	β_0	β_1	β_2	β_3	β
b_{124}	-0,45	-1,41	7,71	-19,44	16,34
b_{125}	-0,31	-0,18	0,01	0,05	-5,75
b_{134}	0,01	0,42	-3,50	8,58	-9,77
b_{135}	-0,0006	0,16	-1,46	4,47	0,10
b_{145}	-0,23	0,19	-1,82	2,04	1,88
b_{234}	-0,09	0,48	-4,09	11,79	-11,72
b_{235}	-0,04	-0,09	1,45	-2,38	4,79
b_{245}	0,516	0,628	3,246	-8,634	9,554
b_{345}	-0,04	0,12	1,31	-2,02	-2,01
b_{1234}	0,04	-0,41	4,81	-14,63	16,26
b_{1235}	0,03	-1,32	12,55	-33,86	25,26
b_{1245}	-0,10	-0,97	7,93	-21,99	14,00
b_{1345}	0,0006	0,64	-3,84	7,14	0,51
b_{2345}	-0,0130	0,0025	0,18	1,11	1,82
b_{12345}	0,0200	-0,3400	4,32	-13,56	10,01

Например,

$$b_{245} = 0,516 + 0,628(a'/w) + 3,246(a'/w)^2 - 8,634(a'/w)^3 + 9,554(a'/w)^4.$$

Таблица 4 была получена по результатам обработки серии из 32 опытов, где b_p находилось как сумма уравнений $K_I = f(a'/w)$, умноженных на произведение кодированных значений параметров, определяемых индексом p , деленная на общее число опытов, т. е. на 32.

Таким образом, подставив значения β из табл. 4 в уравнение (4), получаем коэффициенты b , а подставляя их в уравнение (3) и раскодируя значения x в соответствии с табл. 1, получаем искомый вид зависимости (2).

Влияние каждого параметра или совместного действия параметров на величину КИН не одинаково. Причем, как будет показано ниже, влияние отдельно взятого параметра или совокупности параметров изменяется по мере роста трещины (параметр a'/w). Это влияние, оцениваемое по значениям коэффициентов b в уравнении (3), показывает табл. 5.

Сумма значений каждого столбца табл. 5 — сумма абсолютных значений коэффициентов b по формуле (4) — равна 100 %, а каждое число

в ячейке — число процентов от этой суммы. В строках можно проследить изменение влияния параметра по мере роста трещины. Так, к примеру, мало важный при малых длинах трещины параметр отношения величины горизонтального катета шва к вертикальному начинает оказывать существенное влияние на относительных длинах, превышающих 0,5–0,6, в то время как один из наиболее весомых вначале параметров — относительная длина исходного непровара — в конце роста значительно уменьшает свое влияние.

Анализируя табл. 5, можно сделать вывод о том, что в начале роста трещины наиболее значимыми (влияющими на значения КИН) геометрическими параметрами крестового соединения являются относительная длина исходного непровара и толщина листа, важными — относительная величина вертикального катета шва и отношение толщин свариваемых листов, наименее важным — отношение горизонтального катета шва к вертикальному.

Для упрощения формулы (3) можно ввести понятие уровня влияния параметров или их совместного действия на величину КИН. Уровень влияния позволяет отбросить малозначимые слабые в формуле (3). Так, в табл. 5 выделено три

Таблица 5

Оценка значимости коэффициентов регрессии по абсолютному значению
(степень влияния на итоговое значение КИН)

Коэффициент регрессии	Значение коэффициента при относительной длине a'/w								
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
b_0	34,58	36,35	37,55	37,91	37,75	36,94	35,85	34,78	33,79
b_1	8,13	7,74	7,43	7,21	7,15	7,14	7,16	7,16	7,09
b_2	10,80	9,87	8,95	8,14	7,46	6,81	6,20	5,67	5,21
b_3	1,05	0,30	0,43	1,07	1,75	2,62	3,70	4,88	5,96
b_4	11,50	12,22	12,54	12,61	12,60	12,44	12,13	11,70	11,17
b_5	8,54	9,01	9,55	9,73	9,52	8,92	8,20	7,62	7,29
b_{12}	4,35	4,37	4,15	3,87	3,61	3,31	2,96	2,56	2,14
b_{13}	0,06	0,08	0,01	0,16	0,36	0,66	1,04	1,46	1,84
b_{14}	2,73	2,65	2,59	2,56	2,60	2,70	2,84	2,99	3,10
b_{15}	2,00	1,79	1,79	1,70	1,46	1,17	1,01	1,08	1,39
b_{23}	0,79	0,72	0,53	0,40	0,36	0,32	0,21	0,01	0,31
b_{24}	3,59	3,27	2,95	2,66	2,37	2,01	1,57	1,09	0,64
b_{25}	2,13	2,06	1,87	1,73	1,73	1,84	2,00	2,13	2,17
b_{34}	0,38	0,10	0,17	0,44	0,75	1,14	1,61	2,09	2,50
b_{35}	0,29	0,03	0,18	0,29	0,29	0,24	0,19	0,18	0,22
b_{45}	2,86	3,13	3,16	3,13	3,06	2,82	2,36	1,71	0,96
b_{123}	0,22	0,19	0,15	0,16	0,25	0,38	0,50	0,55	0,54
b_{124}	1,43	1,56	1,44	1,30	1,19	1,04	0,78	0,39	0,07
b_{125}	0,98	0,96	0,92	0,93	1,03	1,22	1,48	1,74	1,94
b_{134}	0,03	0,07	0,02	0,06	0,16	0,31	0,53	0,79	1,05
b_{135}	0,00	0,02	0,02	0,09	0,23	0,46	0,71	0,92	1,06
b_{145}	0,73	0,66	0,64	0,61	0,52	0,35	0,11	0,16	0,40
b_{234}	0,29	0,21	0,21	0,21	0,19	0,21	0,32	0,51	0,76
b_{235}	0,13	0,11	0,03	0,09	0,25	0,46	0,69	0,91	1,09
b_{245}	1,64	1,77	1,87	1,91	1,92	1,89	1,85	1,82	1,80
b_{345}	0,13	0,05	0,04	0,10	0,07	0,05	0,25	0,47	0,67
b_{1234}	0,13	0,10	0,15	0,20	0,25	0,37	0,61	0,97	1,37
b_{1235}	0,10	0,02	0,10	0,12	0,02	0,24	0,37	0,28	0,01
b_{1245}	0,32	0,40	0,34	0,36	0,53	0,78	0,98	1,04	0,92
b_{1345}	0,00	0,10	0,09	0,10	0,22	0,46	0,79	1,10	1,34
b_{2345}	0,04	0,03	0,02	0,11	0,26	0,47	0,68	0,87	0,99
b_{12345}	0,06	0,05	0,08	0,05	0,07	0,23	0,34	0,34	0,23

уровня влияния — 2, 1 и 0,7 % (они выделены соответствующими оттенками фона): уровень влияния больше 2 % имеют слагаемые с коэффициентами $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_{12}, b_{14}, b_{24}, b_{25}, b_{45}$; при уменьшении уровня влияния до 1 % к ним добавляются $b_{15}, b_{124}, b_{125}, b_{245}$. Влияние совместного действия всех остальных параметров можно считать несущественным (в табл. 4 более темным цветом выделены коэффициенты существенно значимых параметров).

Таким образом, при учете коэффициентов с уровнем влияния более 1 % формула (3) для определения K_I при $q = 100$ МПа будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} K_I = & b_0 - 2,33(b_1 + b_2 + b_5) - 4b_3 - 1,67b_4 + \\ & + 3,33b_1 \frac{K_B}{t_1} + 3,33b_2 \frac{a}{t_1} + 5b_3 \frac{K_T}{K_B} + 0,067b_4 t_2 + \\ & + 3,33b_5 \frac{t_1}{t_2} + b_{12} \left(3,33 \frac{K_B}{t_1} - 2,33 \right) \left(3,33 \frac{a}{t_1} - 2,33 \right) + \\ & + b_{14} \left(3,33 \frac{K_B}{t_1} - 2,33 \right) (0,067t_2 - 1,67) + \\ & + b_{15} \left(3,33 \frac{K_B}{t_1} - 2,33 \right) \left(3,33 \frac{t_1}{t_2} - 2,33 \right) + \\ & + b_{24} \left(3,33 \frac{a}{t_1} - 2,33 \right) (0,067t_2 - 1,67) + \\ & + b_{25} \left(3,33 \frac{a}{t_1} - 2,33 \right) \left(3,33 \frac{t_1}{t_2} - 2,33 \right) + \\ & + b_{45} (0,067t_2 - 1,67) \left(3,33 \frac{t_1}{t_2} - 2,33 \right) + \\ & + b_{124} \left(3,33 \frac{K_B}{t_1} - 2,33 \right) \left(3,33 \frac{a}{t_1} - 2,33 \right) \times \\ & \times (0,067t_2 - 1,67) + b_{125} \left(3,33 \frac{K_B}{t_1} - 2,33 \right) \times \\ & \times \left(3,33 \frac{a}{t_1} - 2,33 \right) \left(3,33 \frac{t_1}{t_2} - 2,33 \right) + \end{aligned}$$

$$+ b_{245} \left(3,33 \frac{a}{t_1} - 2,33 \right) (0,067t_2 - 1,67) \times \left(3,33 \frac{t_1}{t_2} - 2,33 \right), \quad (5)$$

где коэффициенты b определяются по формуле (4) с использованием табл. 4.

Полученную зависимость можно сравнить с известной формулой Франка — Фишера определения КИН в вершине непровара в крестовом соединении [4]:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \frac{a}{2} \sec\left(\frac{\pi a}{2w}\right)} \frac{A_1 + \frac{A_2 a}{2w}}{1 + \frac{2k}{t}}, \quad (6)$$

где (см. рис. 1) $k = K_B = K_T$ — катет шва, т. е. $K_T/K_B = 1 = \text{const}$; $t = t_1 = t_2$ — толщина свариваемых листов; $t_1/t_2 = 1 = \text{const}$;

$$\begin{aligned} A_1 = & 0,528 + 3,287 \frac{k}{t} - 4,361 \left(\frac{k}{t} \right)^2 + \\ & + 3,696 \left(\frac{k}{t} \right)^3 - 1,875 \left(\frac{k}{t} \right)^4 + 0,415 \left(\frac{k}{t} \right)^5; \\ A_2 = & 0,218 + 2,717 \frac{k}{t} - 10,171 \left(\frac{k}{t} \right)^2 + \\ & + 13,122 \left(\frac{k}{t} \right)^3 - 7,755 \left(\frac{k}{t} \right)^4 + 1,783 \left(\frac{k}{t} \right)^5; \\ w = & k + t/2. \end{aligned}$$

Ограничением формулы является отношение $a/w = 0,0-0,7$. Преобразуя это соотношение к используемому в нашем исследовании виду относительных параметров, получим зависимость

$\frac{a}{t_1} \leq 0,7 \frac{K_B}{t_1} + 0,35$, а используя граничные условия нашего исследования, получим следующие ограничения: $a/t_1 = 0,63$ при $K_B/t_1 = 0,4$; $a/t_1 = 1,05$ при $K_B/t_1 = 1,0$.

Для сравнения зависимостей (3) и (6) были построены их графики при условии равенства катетов швов и толщин свариваемых листов 10 мм (рис. 3).

На рис. 3 светлый цвет соответствует зависимости (3) с коэффициентами табл. 4, темный цвет — зависимости (6). Диапазон варьирования по шкале a/t_1 от 0,4 до 0,63 взят из условия зависимости (6), диапазон варьирования K_B/t_1 — из табл. 1. При этом график по полученной зависимости (рис. 3) отражает состояние до начала развития трещины, т. е. $a'/w = 0$. Как видно, в указанном диапазоне графики имеют хорошую сходимость; лишь в области низких значений катета шва и высоких значений исходного непровара зависимость Франка—Фишера начинает стремительно возрастать.

Сравнение результатов определения роста трещины от непровара представлены на рис. 4. Здесь рассмотрен случай 22 из табл. 2 при нагрузке 100 МПа. Начало координат 0 является вершиной непровара, используются две горизонтальные шкалы — по относительному размеру трещины и по абсолютному. При построении графика по зависимости Франка—Фишера приходится полагать, что трещина растет прямолинейно по горизонтальной оси (так как траектория трещины не определена), и величина a , подставляемая в формулу (6), каждый раз увеличивается на приращение длины трещины. Это обстоятельство приводит к тому, что при увеличении длины трещины (при больших относительных размерах трещины) графики на рис. 4 начинают существенно расходиться, но на начальном этапе роста (примерно до 0,25 относительной длины трещины) значения K_I отличаются незначительно.

Кроме рассмотренной зависимости Франка—Фишера известен ряд исследований, содержащих зависимости для КИН в вершине трещины от непровара в крестовом сварном соединении при растяжении. Это зависимости Исиды, Кар-

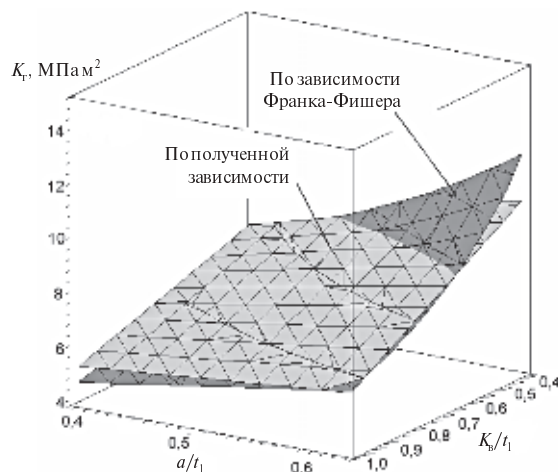


Рис. 3. Графики зависимости K_I от K_B/t_1 и a/t_1 (при $q = 100$ МПа, $t_1 = t_2 = 10$ мм, $K_B = K_T$), для исходного (при нулевой длине трещины) непровара

хина, Койтера, но, как показано в [4], они дают существенные расхождения рассчитываемых значений K_I с результатами определения КИН по предлагаемой нами методике.

Используя полученную зависимость (3), можно оценивать скорость роста трещины и прогнозировать долговечность соединения с начальным непроваром в указанном диапазоне геометрических параметров соединения (см. табл. 1). По результатам исследования можно сделать вывод о непостоянстве степени влияния геометрических параметров соединения по мере роста трещины (см. табл. 5), о существенном влиянии на значения КИН относительного начального непровара и толщины свариваемых листов и малой значимости параметра отношения величин катетов шва (в рассмотренном диапазоне).

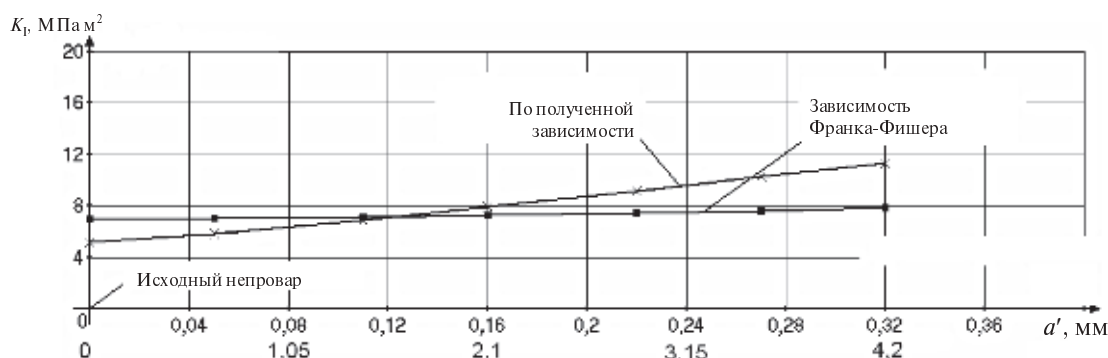


Рис. 4. Графики зависимости $K_I = f(a'/w)$ при $q = 100$ МПа, $t_1 = t_2 = 10$ мм, $K_B = K_T = 10$ мм и величине исходного непровара $a = 4$ мм

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пестриков, В.М. Механика разрушения твердых тел: курс лекций [Текст] / В.М. Пестриков, Е.М. Морозов.— СПб.: Профессия, 2002.— 320 с.
2. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский.— М.: Наука, 1976.— 279 с.
3. Frank, K.H. The fatigue strength of fillet welded connections [Текст]: Ph.D. Thesis / K.H. Frank; Lehigh University.— 1979.
4. Хвостов, А.Е. Ресурс крестового соединения с трещинообразным непрочваром [Текст] / А.Е. Хвостов, К.П. Манжула // Труды СПбГПУ.— № 494.— СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2005.— С. 107–113.

УДК 62-50

Г.А. Левина, В.В. Дрокин

НАГРУЗОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕПЕСТКОВЫХ РАДИАЛЬНЫХ ПОДШИПНИКОВ ТУРБОМАШИН

Растущий интерес к разработкам турбомашин малой и средней мощности с высокоскоростными воздушными микротурбинами определяет актуальность исследований лепестковых газодинамических опор (ЛГО). Область применения таких турбомашин весьма обширна: экологически чистые турбохолодильники для больших камер хранения пищевых продуктов; малогабаритные турбохолодильники для хранения медицинских препаратов; компрессоры и воздухоудки для систем кондиционирования и транспортировки различных смесей; автономные турбогенераторы. Применение ЛГО целесообразно для роторов массой до 25 кг и с рабочими скоростями вращения не менее 20000 об/мин.

Требуются надежные методы расчета и проектирования ЛГО при заданных условиях их использования в турбомашинах.

Оценка работоспособности опорного узла выполняется прежде всего по нагрузочной характеристике — зависимости модуля результирующей реакции смазочного слоя опоры от смещения вала в стационарных условиях. Математическое моделирование нагрузочных характеристик ЛГО в данной работе основано на решении упругогидродинамической (УГД) задачи для газовой опоры, одна из рабочих поверхностей которой образована упругими оболочками-лепестками. В результате численного решения УГД задачи находятся конфигурация

пакета лепестков в зазоре между цапфой и втулкой подшипника, конфигурация зазора между цапфой и лепестками, распределение давления газового смазочного слоя по поверхности цапфы, результирующие реакции и момент трения.

Для лепестковой опоры также важно определение статической нагрузочной характеристики, рассматриваемой без вращения вала. Решая статическую задачу упругости, определяем контактные силы, действующие на вал со стороны пакета лепестков, и зависимость результирующей этих сил от смещения вала.

Приведенные в настоящей статье результаты получены по авторской программе [1] с помощью численного метода, отраженного в работах [2, 3].

Рассматривается схема радиального лепесткового подшипника (ЛГП) с перекрывающимися лепестками (рис. 1).

При построении математической модели подшипника приняты следующие исходные предпосылки и допущения: лепесток рассматривается как тонкая упругая цилиндрическая оболочка, для которой справедливы гипотезы Кирхгофа—Лява; средняя линия лепестка считается нерастяжимой, а упругие перемещения лепестка — малыми (задачу о прогибах рассматриваем как геометрически линейную).

Краевые условия для упругих перемещений лепестка соответствуют глухой заделке лепестка



по одному (левому) краю и свободному опиранию другого (правого) края на соседний лепесток.

Рассматривается плоская модель подшипника, не учитывающая перекосы вала в опорах и осевое течение газовой среды в зазоре опоры. Газовый смазочный слой опоры принимается тонким, для которого справедливы обычные допущения теории газовой смазки [4].

УГД задача решается для условий стационарного нагружения подшипника путем прямых итераций «прогиб — давление — прогиб ...».

Определение деформированной конфигурации упругого пакета в зазоре между поверхностями цапфы и втулки выполняется численным решением вариационной задачи минимизации потенциальной энергии системы лепестков с ограничениями, выражающими краевые условия и естественные условия неврезания лепестка в соседние лепестки, цапфу и втулку. В нагруженном радиальном подшипнике каждый лепесток упругого пакета находится в своих условиях геометрических ограничений на упругие перемещения и на каждом лепестке формируется свое избыточное давление смазочного слоя. При этом потенциальная энергия Π упругого пакета рассматривается как функционал от распределения прогибов лепестков $W_i(\varphi^*)$, $i = \overline{1, N}$, где i — номер лепестка. Прогиб $W(\varphi^*)$ отсчитывается вдоль полярного радиуса, проведенного из точки Q . Положительное направление прогиба $W(\varphi^*)$ — в сторону увеличения полярного радиуса произвольной точки средней линии лепестка.

$$\Pi = L \sum_{i=1}^N \left[\frac{D}{2} \int_0^{\Phi_i^*} \frac{1}{R_{\text{л}}^3} (\ddot{W}_i + W_i)^2 d\varphi^* - R_{\text{л}} \int_{\Phi_2^*}^{\Phi_1^*} Q_i W_i d\varphi^* \right], \quad (1)$$

где L — длина подшипника в осевом направлении; N — количество лепестков опоры;

$D = \frac{E\delta_0^3}{12(1-\nu^2)}$ — коэффициент цилиндрической жесткости оболочки лепестка; E — модуль упругости 1-го рода материала лепестка; δ_0 — толщина лепестка без покрытия; ν — коэффициент Пуассона; $R_{\text{л}}$ — радиус средней линии

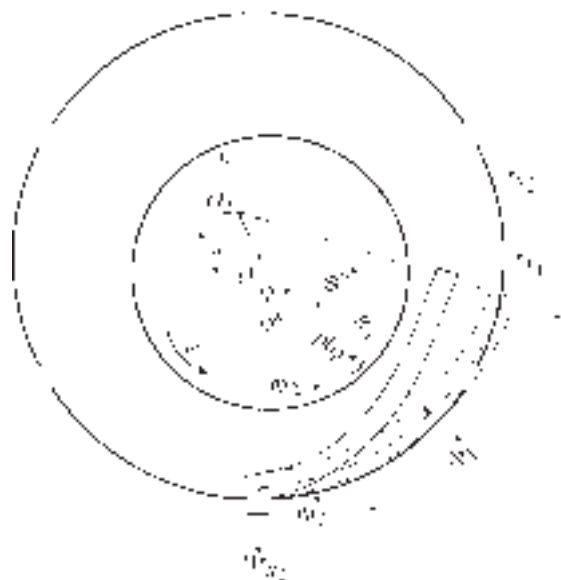


Рис. 1. К постановке задачи о реакциях лепесткового подшипника: $O_1x_1y_1$ — система координат, связанная с втулкой подшипника; $O_2x_2y_2$ — система координат, связанная со средней линией лепестка

недеформированного лепестка; $Q_i = P_i - P_a$ — избыточное давление в смазочном слое, ограниченном лепестком с номером i ; P_i — давление в смазочном слое с номером i ; P_a — давление окружающей газовой среды; φ^* — полярный угол точки средней линии лепестка в системе координат, связанной с лепестком. Пределы интегрирования соответствуют расчетной схеме, представленной на рис. 1.

Минимизация функционала энергии выполняется путем дискретизации с последующим применением метода проекций градиента.

При численном решении УГД задачи используются сеточные функции полярных углов в системе координат, связанной с втулкой подшипника. Преобразование полярных координат из системы, связанной с лепестком, осуществляется по следующим соотношениям:

для полярного радиуса точки средней линии лепестка

$$\begin{cases} \rho(\varphi^*) = \sqrt{R_{\text{л}}^2 + a^2 - 2R_{\text{л}}a \cos(\chi - \varphi^*)} & \text{при } \varphi^* < \chi; \\ \rho(\varphi^*) = \sqrt{R_{\text{л}}^2 + a^2 - 2R_{\text{л}}a \cos(\varphi^* - \chi)} & \text{при } \varphi^* \geq \chi, \end{cases} \quad (2)$$

где a — расстояние между центрами окружности внутренней поверхности втулки и дуги средней

линии лепестка; χ — угол между координатной осью x_2 и линией $(Q_1 Q_2)$ (см. рис. 1);

для полярного угла точки средней линии лепестка

$$\varphi(\varphi^*) = \arccos\left(\frac{A}{-2(R_{\text{вт}} - 0,5\delta_0)\rho(\varphi^*)}\right); \quad (3)$$

$$A = 2R_{\text{л}}^2(1 - \cos \varphi^*) - (R_{\text{вт}} - 0,5\delta_0)^2 - \rho^2(\varphi^*).$$

Распределение давления в слое смазки описывается уравнением Рейнольдса

$$\frac{d}{d\varphi}\left(h_i^3 p_i \frac{dp_i}{d\varphi} - \Lambda p_i h_i\right) = 0 \quad (4)$$

с краевыми условиями для границ, открытых в окружающую среду,

$$p_i(\Phi_1) = p_i(\Phi_2) = 1, \quad (5)$$

где $h_i = h_i(\varphi) = \frac{H_i(\varphi)}{H^*}$ — функция зазора; $p_i = p_i(\varphi) =$

$\frac{P_i(\varphi)}{P_a}$ — безразмерное давление; H — зазор

между цапфой и лепестком; H^* — характерный

зазор; $\Lambda = \frac{6\mu\omega R_{\text{ц}}^2}{P_a H^{*2}}$ — газодинамический параметр

подшипника; μ — динамический коэффициент вязкости газовой среды; ω — угловая скорость вращения вала; $R_{\text{ц}}$ — радиус цапфы вала.

Краевая задача решается для каждого сектора с номером i . Численное решение краевой задачи (4), (5) выполняем в виде итерационного процесса Ньютона — Канторовича, на каждом этапе которого соответствующие линейные уравнения аппроксимируем разностной схемой по методу баланса с последующим применением немонотонной прогонки и процедуры поправок приращений давления (регуляризации) [2]:

$$p_{ij}^{(n+1)} = p_{ij}^{(n)} + \beta \Delta p_{ij}, \quad (6)$$

где Δp_{ij} — разности сеточных значений давления при входе в итерационный шаг с номером n и значений, полученных после решения сеточных уравнений этой итерации. Параметр β определяем по условию минимума нормы вектора невязки нелинейных разностных уравнений, соответствующих (4), после подстановки в них (6):

$$\sigma(\beta) = \|L_{\Delta} p^{(n+1)}\| \Rightarrow \min. \quad (7)$$

Итерационный УГД процесс при заданном положении цапфы завершается по условию

$$\frac{|p_{ij(n+1)} - p_{ij(n)}|}{p_{ij(n+1)}} < \varepsilon^*, \quad (8)$$

где ε^* — заданная величина.

По результатам решения УГД задачи определяем приложенную к валу результирующую сил давления смазочного слоя $\vec{F} = (F_x; F_y)$. Здесь

$$F_x = -\sum_{i=1}^N L R_{\text{ц}} \int_{\Phi_2}^{\Phi_1} P_i(\varphi) \sin \varphi d\varphi;$$

$$F_y = \sum_{i=1}^N L R_{\text{ц}} \int_{\Phi_2}^{\Phi_1} P_i(\varphi) \cos \varphi d\varphi. \quad (9)$$

Предельная несущая способность $F_{\text{пр}}$ определяется по достижении для некоторого $\varphi \in [0; 2\pi]$ допустимого минимального зазора H_{min} , если при этом существуют точки контакта нижнего лепестка с втулкой.

По решению УГД задачи определяем напряжения вязкого трения на поверхности цапфы

$$\tau|_{\eta=0} = \mu \frac{\partial V_{\varphi}}{\partial \eta} \Big|_{\eta=0} = -\left(\frac{\mu\omega R_{\text{ц}}}{H} + \frac{1}{2R_{\text{ц}}} \frac{\partial P}{\partial \varphi} H \right). \quad (10)$$

Здесь координата η отсчитывается от поверхности цапфы вдоль полярного радиуса, исходящего из центра втулки.

Определяем величину главного момента сил вязкого трения, распределенных по поверхности цапфы:

$$M_{\text{втр}} = \frac{L R_{\text{ц}}^3 \mu \omega}{H^*} \int_0^{2\pi} \left(\frac{3}{\Lambda} \frac{\partial p}{\partial \varphi} h + \frac{1}{h} \right) d\varphi. \quad (11)$$

Момент сил сухого трения опоры, действующий при пуске и останове ротора, определяется с помощью закона Амонтона — Кулона с использованием найденных в результате решения статической задачи упругости нормальных контактных сил

$$M_{\text{тр}} = k_{\text{тр}} R_{\text{ц}} \sum_{i=1}^N F_i, \quad (11)$$

где $k_{\text{тр}}$ — коэффициент трения скольжения покрытия лепестка по поверхности вала; F_i — ре-



зультатирующая контактная сила, приложенная к валу со стороны лепестка с номером 1.

Программа для ЭВМ, созданная в среде Delphi, позволяет вычислять нагрузочные характеристики, используя ряд важнейших конструктивных параметров лепесткового газодинамического подшипника [1], в числе которых: указанные выше параметры $R_{\text{ц}}$, δ_0 , L , а также внутренний радиус втулки $R_{\text{вт}}$, толщина покрытия лепестка $\delta_{\text{п}}$, монтажный зазор в подшипнике $H_{\text{м}} = R_{\text{вт}} - R_{\text{ц}} - 2(\delta_0 + \delta_{\text{п}})$, угол установки лепестка (между касательной к средней линии недеформированного лепестка в ее закрепленной точке и касательной к окружности втулки) α_0 , длина средней линии недеформированного лепестка $l_{\text{л}}$, параметры профиля средней линии недеформированного лепестка — протяженность профилированной области и радиус кривизны. К указанным геометрическим параметрам добавляются физико-механические параметры: коэффициенты ν , μ , $k_{\text{тр}}$; скорость ω ; давление $P_{\text{а}}$ и температура окружающей газовой среды T . Пользователю также доступны параметры решателя УГД задачи: количество узлов на средней линии лепестка при дискретизации задачи упругости и задачи о распределении давления в газовом слое; величины, характеризующие окончания итерационных процессов.

Представлены результаты вычислений для радиального подшипника турбогенератора с параметрами: $N = 8$; $R_{\text{ц}} = 30,5$ мм; $l_{\text{л}} = 43$ мм; $R_{\text{л}} = 34$ мм; $\alpha = 5^\circ$; $L = 54$ мм; $\sigma_0 = 0,15$ мм; $\sigma_{\text{п}} = 0,02$ мм; $H_{\text{м}} = 0,12$ мм; профиль — нет; $T = 500$ С; $P = 4$ атм.

На рис. 2 — расчетные нагрузочные характеристики при различных скоростях вращения вала. На рис. 3 — зависимости максимального избыточного давления в зазоре Q_{max} и минимального зазора в опоре H_{min} от относительного эксцентриситета вала и втулки ε . Номера линий и индексы обозначений на графиках соответствуют следующим скоростям вращения вала: 1 — 10000 об/мин; 2 — 25000 об/мин; 3 — 60000 об/мин; 4 — 72000 об/мин; 5 — статическая нагрузочная характеристика.

По результатам вычислений нагрузочных характеристик ЛГП с указанными параметрами сформулированы основные выводы.

1. Нагрузочные характеристики при заданных скоростях вращения вала 10000–72000 об/мин близки к статической нагрузочной характерис-

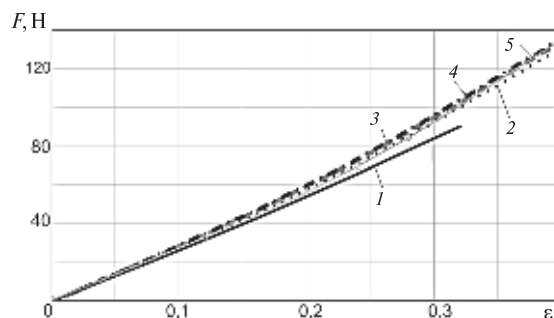


Рис. 2. Нагрузочные характеристики ЛГП

тике. Это соответствует представлению о том, что при умеренных нагрузках (меньше предельной) жесткость ЛГО определяется жесткостью упругого пакета лепестков.

2. От скорости вращения зависят максимальные избыточные давления и минимальные зазоры в опоре.

3. По рассчитанным нагрузочным характеристикам ЛГП можно определить приближенно скорость «всплытия» вала турбомашин на газовом слое. Анализ данных о подъемной силе подшипника и толщине газового слоя позволяет заключить, что при скорости около 10000 об/мин происходит «всплытие» вала.

4. Вследствие существующего преднатяга в подшипнике (упругий пакет после сборки опорного узла деформирован цапфой вала) момент сухого трения отличен от нуля даже при центральном положении вала. Момент сухого трения при пуске/останове ротора турбомашин превышает момент вязкого трения примерно в 10 раз.

С целью верификации полученных решений статической задачи создана плоская параметрическая модель радиального лепесткового подшипника в пакете инженерных расчетов Ansys v.12 в масштабе 1:1. Рассмотрены три взаимодействующих лепестка при центральном положении цапфы. Такое упрощение позволяет наблюдать особенности численного решения вариационной контактной задачи методом конечных элементов с большим числом контактных элементов. Определены устойчивые сходящиеся решения для ряда вариантов радиальных ЛГО, хорошо совпадающие с данными, полученными по авторской программе: при центральном положении формы деформированного упругого пакета в зазоре опоры и области рас-

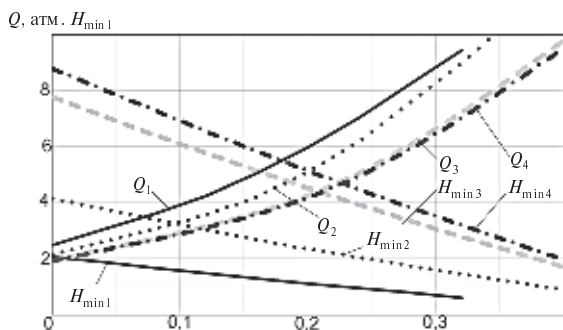


Рис. 3. Максимальные избыточные давления и минимальные зазоры в опоре

пределения контактных сил совпадают. Относительная погрешность определения контактных сил взаимодействия лепестков друг с другом и с валом не превышает 15 %.

Полученный опыт вычислений по созданной программе нагрузочных характеристик радиальных лепестковых газодинамических подшипников для проектов турбомашин — малогабаритного экологически чистого турбохолодильника и турбогенератора — позволяет сделать вывод о том, что нагрузочные характеристики опоры наиболее существенно зависят от таких конструктивных параметров, как толщина лепестка, величина монтажного зазора и угол установки лепестка. При выборе параметров опоры приходится искать компромисс между достижением достаточной жесткости подвеса и возможностью всплытия вала на газовом слое. Накопленные расчетные данные позволяют перейти к разработке на основе созданной вычислительной программы методики автоматизированного проектирования ЛПП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. 2009616105 (Российская Федерация) «Упругогидродинамический расчет нагрузочных характеристик лепесткового газодинамического подшипника» v.1.0 [Текст] / Г.А. Левина, В.В. Дрокин; заявители и патентообладатели общество с ограниченной ответственностью «ЭкоТурбо» и Южно-Уральский государственный университет. — № 2009614875; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 5.11.2009.
2. Левина, Г.А. Определение реакций лепесткового газодинамического подшипника / Г.А. Левина, В.В. Смирнов / Челябинск. политехн.

ин-т. — Челябинск 1984. — Деп. в ВИНТИ 2.10.84, № 7211–84.

3. Левина, Г.А. Решение упругогидродинамических задач и анализ нагрузочных характеристик лепесткового газодинамического подпятника с профилированными лепестками [Текст] / Г.А. Левина, А.К. Бояршинова // Машиноведение. — 1989. — № 4. — С. 88–94.

4. Сипенков, И.Е. Прецизионные газовые подшипники [Текст] / И.Е. Сипенков, А.Ю. Филиппов, Ю.Я. Болдырев [и др.]; Под ред. А.Ю. Филиппова и И.Е. Сипенкова / СПб. ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2007. — 504 с. — ISBN 5-900780-63-5.

УДК 621.515

Ю.Б. Галёркин, К.В. Солдатова, А.А. Дроздов

УТОЧНЕНИЕ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА В ЦЕНТРОБЕЖНОЙ КОМПРЕССОРНОЙ СТУПЕНИ

К газодинамическому совершенству промышленных центробежных компрессоров предъявляются высокие требования в связи с большим потреблением энергии. Установленная мощность таких машин только в газовой промышленности Российской Федерации приближается к 45 млн кВт [7–10]. Сложный характер рабочего процесса делает невозможным аналитическое решение и за-

трудняет численное моделирование при расчете газодинамических характеристик. Поэтому в основе методов газодинамического проектирования лежат данные испытания как модельных ступеней, так и ранее выпущенных компрессоров. Использование теории подобия позволяет на этой основе осуществлять проекты с достоверными газодинамическими характеристиками [5].



В работе [6] описан инженерный метод оптимального газодинамического проектирования, основанный на широком обобщении результатов испытаний модельных ступеней и компрессоров. Комплекс соответствующих компьютерных программ получил название «Метод универсального моделирования».

Применение метода в практике проектирования позволило существенно уменьшить необходимость проверки получаемых результатов испытаниями уменьшенных моделей проточной части.

В последние годы с помощью метода созданы десятки центробежных компрессоров с высокой эффективностью [1–3, 6].

В работе [2] результаты заводских испытаний 16-ти промышленных центробежных компрессоров сопоставлены с газодинамическими характеристиками, рассчитанными в процессе применения метода универсального моделирования.

Заданное отношение давлений во всех случаях было обеспечено. Практически во всех случаях различие в КПД находилось в пределах погрешности измерений. Однако на нерасчетных режимах совпадение характеристик оказалось неудовлетворительным, хотя во всех случаях характеристики испытанных машин оказались лучше, чем ожидавшиеся по проекту.

В работах [2, 3] представлены результаты корректировки моделей потери напора, при которых за счет подбора эмпирических коэффициентов газодинамические характеристики более 80-ти ступеней, входящих в состав испытанных компрессоров, моделируются с высокой точностью. Однако хороший результат достигнут за счет применения индивидуального набора эмпирических коэффициентов применительно к каждому из испытанных компрессоров. В предлагаемой статье предпринят анализ путей совершенствования расчетных алгоритмов, чтобы моделирование газодинамических характеристик можно было бы производить с минимальным набором эмпирических коэффициентов.

Газодинамические характеристики ступени представляются в виде зависимостей политропного КПД и отношения давлений от условного коэффициента расхода (формула для КПД относится к промежуточной ступени в составе рабочего колеса (РК) + лопаточный диффузор (ЛД) + обратно-направляющий аппарат (ОНА) (рис. 1):

$$\eta = \left[1 - 0,5 \frac{\zeta_{\text{РК}}}{\psi_{\text{Т}}} \left(\frac{w'_1}{u_2} \right)^2 - 0,5 \frac{\zeta_{\text{ЛД}}}{\psi_{\text{Т}}} \left(\frac{c'_3}{u_2} \right)^2 - 0,5 \frac{\zeta_{\text{ОНА}}}{\psi_{\text{Т}}} \left(\frac{c'_4}{u_2} \right)^2 \right] / (1 + \beta_{\text{пр}} + \beta_{\text{тр}});$$

$$\pi = \left(1 + (k-1) M_u^2 \psi_i \right)^{\frac{k-1}{k\eta}}, \quad (1)$$

где η — КПД; $\zeta_{\text{РК}}$, $\zeta_{\text{ЛД}}$, $\zeta_{\text{ОНА}}$ — коэффициенты потерь в рабочем колесе, лопаточном диффузоре, обратно-направляющем аппарате; c — абсолютная скорость потока; $\psi_i = \psi_{\text{Т}} (1 + \beta_{\text{пр}} + \beta_{\text{тр}})$, ψ_i — коэффициент внутреннего напора; $\psi_{\text{Т}}$ — коэффициент теоретического напора; $\beta_{\text{пр}}$ — коэффициент протечек; $\beta_{\text{тр}}$ — коэффициент дискового трения; w' — скорость с учетом стеснения потока; w'' — скорость в горле канала; u — окружная скорость; π — отношение давлений; k — показатель изоэнтропы; M_u — число Маха; 1, 3, 4 — параметры потока и размеры контрольных сечений на границе элементов проточной части.

При расчете газодинамических характеристик коэффициенты потерь элементов, входящие в формулы (1), являются объектами математического моделирования в виде функций

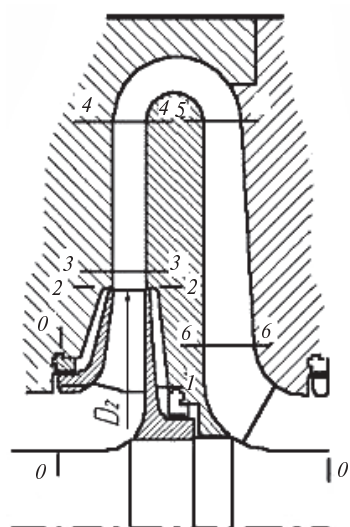


Рис. 1. Схема проточной части центробежной ступени промежуточного типа

$$\zeta = f\left(\bar{W}, \frac{a}{l}, \frac{b}{l}, M_{\max}\right), \quad (2)$$

где f — площадь поперечного сечения; \bar{W} — символическое обозначение диаграммы поверхностных скоростей; a — расстояние между лопатками по нормали; b — высота лопаток; (скорость потока в неподвижной системе координат); l — высота лопаток; M_{\max} — максимальное число Маха.

Форма элемента, непосредственно определяющая коэффициент потерь, трудно выражается набором величин. Поэтому форма представлена посредством совокупности густоты решетки a/l , удлинения лопаток b/l и характерных значений поверхностных скоростей на лопатках — w_{31}/u_2 , w_{32}/u_2 , $w_{п1}/u_2$, $w_{п2}/u_2$, где 1, 2 — параметры потока и размеры контрольных сечений на границе элементов проточной части (рис. 2).

В формуле (2) эти характерные скорости изображены символом \bar{W} .

Получение характеристик требует сначала произвести термогазодинамический расчет, цель которого — определение параметров потока в контрольных сечениях. Для нахождения КПД по формуле (1) нужно определить скорости w'_1/u_2 , c'_3/u_2 , c'_4/u_2 . Для расчета ударных по-

терь на нерасчетных режимах нужно также знать скорости в горле межлопаточных каналов w''_1/u_2 , c''_3/u_2 , c''_4/u_2 . В зависимости от скоростей на входе определяются скорости на поверхностях лопаток. После этого производится расчет потерь напора и КПД по алгебраическим уравнениям с эмпирическими коэффициентами.

Анализ расчетов по существующим программам метода универсального моделирования показал, что совершенствование возможно по обоим направлениям — как алгоритмов термогазодинамического расчета, так и моделей КПД и напора ступеней. Наша статья посвящена решению первой проблемы.

Термогазодинамический расчет формировался в процессе развития метода универсального моделирования с середины 1980-х годов [4]. Ограниченные возможности существовавшей тогда вычислительной техники делали целесообразным введение упрощений для инженерных расчетов, так как оптимизация проточной части требует сопоставления сотен вариантов ступеней, при этом расчет каждого варианта производится с множеством итерационных процессов. Сейчас использование приема упрощенных вычислений неактуально. Авторы предлагают вниманию уточненный и детализированный алгоритм расчета. Особое внимание уделено расчету входа в лопаточные решетки. При переходе от скорости перед решеткой w_1 к скорости с учетом стеснения потока w'_1 , а затем к скорости в горле канала w''_1 происходит значительное изменение плотности, влияющее на КПД, особенно на нерасчетных режимах. Сделаны и другие уточнения, повышающие точность моделирования.

Основой всех программ рассматриваемого метода служит программа решения прямой задачи — расчет газодинамических характеристик ступени с известными размерами и начальными условиями. Расчеты ведутся в безразмерном виде. Перед проточной частью ступени (рис. 1) может быть входной патрубок с регулирующим направляющим аппаратом, который имеет поворотные лопатки. На входе в ступень в сечении «н» заданы параметры торможения.

Для расчета плотности по статическим параметрам в сечении «н» используются уравнения изоэнтропного процесса, согласно которым коэффициент изменения плотности равен

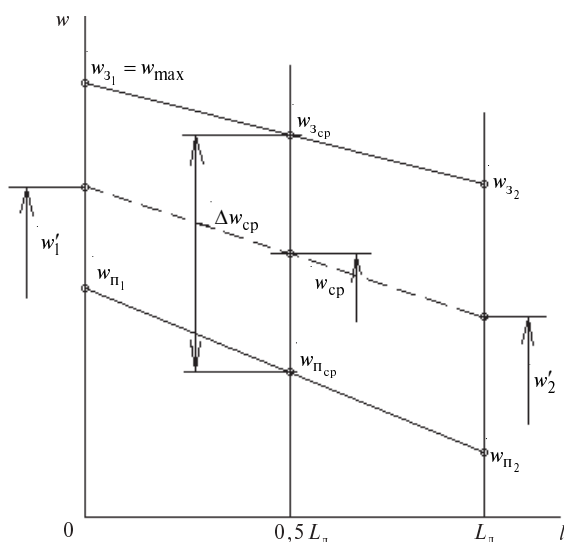


Рис. 2. Схематическая диаграмма поверхностных скоростей на лопатках рабочего колеса.

(индексы: п — передняя сторона лопатки; з — задняя сторона лопатки)



$$\begin{aligned}\varepsilon_H &= \frac{\rho_H}{\rho_H^*} = \left(\frac{T_H}{T_H^*} \right)^{\frac{1}{k-1}} = \left(\frac{T_H^* - \frac{c_H^2}{2c_p}}{T_H^*} \right)^{\frac{1}{k-1}} = \\ &= \left(1 - \frac{c_H^2}{2c_p T_H^*} \right)^{\frac{1}{k-1}} = \left(1 - \frac{c_H^2}{2 \frac{k}{k-1} R T_H^*} \right)^{\frac{1}{k-1}} = \\ &= \left(1 - 0,5(k-1) \frac{c_H^2 u_2^2}{k R T_H^* u_2^2} \right)^{\frac{1}{k-1}} = \\ &= \left(1 - 0,5(k-1) \bar{c}_H^2 M_H^2 \right)^{\frac{1}{k-1}},\end{aligned}\quad (3)$$

где $c_p = \frac{k}{k-1} R$; $M_u = \frac{u_2}{\sqrt{k R T_H^*}}$, $\bar{c}_H = \frac{\Phi}{\varepsilon_H \frac{f_H}{\pi D_2^2}}$ —

площадь входного сечения «н»; ε — отклонение (поворот) потока; ρ — плотность газа; T — температура; * — относится к полным параметрам (параметры торможения); R — газовая постоянная; Φ — условный коэффициент расхода; D — диаметр рабочего колеса.

Коэффициент расхода Φ при расчете характеристик является аргументом функций. Программа автоматически меняет его значения $\Phi \geq \Phi_{\text{расч}}$. Расчет требует итераций, так как значения \bar{c}_H и ε_H взаимосвязаны.

При движении газа в патрубке имеют место потери напора, поэтому плотность изменяется в соответствии с уравнениями политропного процесса

$$\varepsilon_{H-0} = \varepsilon_H \left(\frac{1 - 0,5(k-1) \bar{c}_{H-0}^2 M_u^2}{1 - 0,5(k-1) \bar{c}_H^2 M_u^2} \right)^{\frac{1}{n-1}}, \quad (4)$$

где $\bar{c}_{H-0} = \frac{\Phi}{\varepsilon_{H-0} (\bar{D}_1^2 - \bar{D}_{\text{см}}^2) \sin \alpha_0}$; n — показатель

политропного процесса; $\bar{D}_{\text{вт}}$ — относительный

диаметр втулки, $\bar{D}_{\text{вт}} = \frac{D_{\text{вт}}}{D_2}$; $\bar{c}_{H-0} = \frac{c_{H-0}}{u_2}$; над-

строчная черта означает, что скорость отнесена к характерной скорости вращения, а линейный размер отнесен к характерному линейному размеру (наружному диаметру рабочего колеса).

Показатель политропы меньше показателя изоэнтропы, так как входной патрубок — конфузорный ($n < k$). Соотношение вытекает из соот-

ветствующих уравнений: $\frac{n}{n-1} R(T_2 - T_1) = \frac{k}{k-1} \times$
 $\times R(T_2 - T_1) + h_w$, где h_w — потерянный напор;

$$\frac{n}{n-1} = \frac{k}{k-1} + \frac{h_w}{R(T_2 - T_1)} = \frac{k}{k-1} + \frac{k}{k-1} \frac{\zeta \bar{w}_2^2}{\bar{w}_2^2 - \bar{w}_1^2}, \quad \frac{n}{n-1} =$$

$$= \frac{k}{k-1} \left(1 + \frac{\zeta}{1 - \frac{\bar{w}_1^2}{\bar{w}_2^2}} \right). \text{ Коэффициент потерь имеет}$$

в данном случае две составляющие — для потерь собственно в трубке и для потерь во входном направляющем аппарате.

Тогда

$$n = \frac{1}{1 - \frac{k-1}{k \left(1 + \frac{\zeta_{\text{вп}} + \zeta_{\text{ВНА}}}{1 - \frac{\bar{c}_H^2}{\bar{c}_{H-0}^2}} \right)}}, \quad (5)$$

где $\zeta_{\text{вп}}$ — потери во входном патрубке.

Коэффициент потерь в трубке принимается пользователем по экспертной оценке. Для коэффициента потерь входного направляющего аппарата использованы данные из аэродинамических характеристик решетки плоских профилей.

В сечении после ВНА на входе в рабочее колесо к основному потоку присоединяется поток протечек в лабиринтном уплотнении покрывающего диска. Массовый расход в рабочем колесе больше расхода на входе в ступень:

$$\Phi_0 = \Phi(1 + \beta_{\text{пр}}). \quad (6)$$

Более горячий газ протечек повышает температуру торможения на входе в РК:

$$\frac{T_0^*}{T_H^*} = 1 + \frac{h_i \beta_{\text{пр}}}{\frac{k}{k-1} R T_H^*} = 1 + \psi_i \beta_{\text{пр}} M_u^2. \quad (7)$$

Соответствующее изменение плотности:

$$\varepsilon_0 \approx \frac{\varepsilon_{H-0}}{\left(\frac{T_0^*}{T_H^*} \right)}. \quad (8)$$

Коэффициент сжимаемости в сечении «1» на входе в межлопаточные каналы РК рассчитывается по формуле

$$\varepsilon'_1 = \frac{\rho'_1}{\rho_0} = \left(\frac{T_1^*}{T_0^*} \right)^{\frac{1}{n-1}} = \frac{\left(\frac{T_0^* - \frac{c_1'^2}{2k}}{k-1} \right)^{\frac{1}{n-1}}}{\left(\frac{T_0^* - \frac{c_0'^2}{2k}}{k-1} \right)} =$$

$$= \varepsilon_0 \left(\frac{1 - \frac{(k-1)}{(k+1)} \bar{c}_1'^2 \lambda_u^2}{1 - \frac{(k-1)}{(k+1)} \bar{c}_0'^2 \lambda_u^2} \right)^{\frac{1}{n-1}}, \quad (9)$$

где λ_u — коэффициент скорости,

$$\lambda_u = \frac{u_2}{\sqrt{\frac{2k}{k+1} R T_0^*}} = \frac{M_u}{\sqrt{\frac{2}{k+1} (1 + \psi_i^* \beta_{\text{пр}} M_u^2)}}. \quad (10)$$

Показатель процесса в уравнении (9) зависит от соотношения скоростей в начале и конце рассматриваемого участка. Обычно на расчетном режиме ВНА не поворачивает поток и течение чисто меридиональное, угол потока в сечении «0» равен нулю. В этом случае соотношение скоростей зависит от отношения площадей сечений «0» и «1» и от коэффициента стеснения

$$\tau_1 = 1 - \frac{0,7 z \bar{\delta}_{\text{ЛРК}}}{\pi \bar{D}_1 \sin \beta_{\text{Л1}}}, \text{ где } \tau \text{ — коэффициент стес-$$

нения; $\beta_{\text{Л}}$ — угол между касательной к средней линии лопатки рабочего колеса и обратным окружным направлением; $\delta_{\text{ЛРК}}$ — толщина лопатки рабочего колеса; z — число лопаток.

У современных ступеней на расчетном режиме обычно $c'_1 < c_0$, при этом показатель процесса равен

$$n = \frac{1}{1 - \frac{k \left(1 - \frac{\zeta_{0-1}}{1 - \frac{\bar{c}_1'^2}{\bar{c}_0'^2}} \right)}{k-1}}. \quad (11)$$

При наличии закрутки ($\alpha_0 \neq 0$) скорость потока перед лопатками возрастает, $\bar{c}_1' = \sqrt{\bar{c}_{u1}^2 + \bar{c}_{r1}^2}$ и течение, вероятнее всего, становится конфузурным. В этом случае показатель процесса равен

$$n = \frac{1}{1 - \frac{k \left(1 + \frac{\zeta_{0-1}}{1 - \frac{\bar{c}_0'^2}{\bar{c}_1'^2}} \right)}{k-1}}. \quad (12)$$

Закрутка потока в сечении «1» принимается равной $\bar{c}_{u1} = \frac{\bar{c}_{H-0} \cos \alpha_0}{\bar{D}_1 / \bar{D}_0}$.

Коэффициент потерь ζ_{0-1} рассчитывается по математической модели этого безлопаточного элемента.

Важным моментом расчета ударных потерь и потерь межлопаточных каналов является корректный расчет скорости w_1'' в косом срезе (горле) межлопаточного канала. В зависимости от режима обтекания течение здесь конфузурное, если угол потока на входе больше угла безударного входа, и наоборот.

Коэффициент сжимаемости в косом срезе определяется выражением

$$\varepsilon_1'' = \varepsilon_1' \left(\frac{1 - \frac{(k-1)}{(k+1)} \bar{w}_1''^2 \tilde{\lambda}_u^2}{1 - \frac{(k-1)}{(k+1)} \bar{w}_1'^2 \tilde{\lambda}_u^2} \right)^{\frac{1}{n-1}}. \quad (13)$$

Здесь коэффициент скорости в относительном движении с учетом повышения температу-



ры торможения во вращающейся системе координат равен

$$\tilde{\lambda}_u = \frac{\lambda_u}{\sqrt{1 + \frac{k-1}{k+1} \lambda_u^2 \bar{D}_1}}. \quad (14)$$

Скорость потока в косом срезе межлопаточного канала определяется из уравнения неразрывности:

$$\bar{w}_1'' = \frac{\Phi_0}{4\varepsilon_1' b_1 \bar{D}_1 \tau_1 \sin \beta_{л1}}. \quad (15)$$

В случае безударного обтекания лопаточной решетки показатель политропы равен показателю изоэнтропы, в случае ударного обтекания показатель политропы определяется по представленным выше формулам, которые принимают вид

$$\bar{w}_1' > \bar{w}_1'', \quad n = \frac{1}{1 - \frac{k-1}{k \left(1 - \frac{\xi_{уд}}{(1 - \bar{w}_1'^2 / \bar{w}_1''^2)} \right)}} \quad \text{в случае}$$

замедленного течения при положительных углах атаки, где $\xi_{уд}$ — коэффициент ударных потерь;

$$\bar{w}_1' < \bar{w}_1'', \quad n = \frac{1}{1 - \frac{k-1}{k \left(1 + \frac{\xi_{уд}}{(1 - \bar{w}_1'^2 / \bar{w}_1''^2)} \right)}} \quad \text{в случае}$$

ускоренного течения при отрицательных углах атаки.

Для расчета коэффициента $\xi_{уд}$ используется математическая модель ударных потерь.

Коэффициент сжимаемости в межлопаточном канале рабочего колеса

$$\varepsilon_2' = \varepsilon_1'' \left(\frac{\frac{T_2^*}{T_{0i}^*} - \frac{k-1}{k+1} \lambda_u^2 (\phi_2'^2 + \bar{c}_{u2}^2)}{1 - \frac{k-1}{k+1} \bar{c}_0^2 \lambda_u^2} \right)^{\frac{1}{n-1}}. \quad (16)$$

В рабочем колесе происходит процесс сжатия газа с подводом механической энергии $h_i = \psi_i u_2^2$, поэтому показатель политропы определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{n}{n-1} R(T_2 - T_1) &= \frac{k}{k-1} R(T_2 - T_1) - h_w; \\ \frac{n}{n-1} &= \frac{k}{k-1} - \frac{h_w}{R(T_2 - T_1)} = \\ &= \frac{k}{k-1} - \frac{k}{k-1} \frac{\zeta_{ПК} w_1''^2}{T_1^* + \Delta T^* - w_2'^2 - T_1^* + w_1''^2}; \\ \frac{n}{n-1} &= \frac{k}{k-1} - \frac{k}{k-1} \frac{\zeta_{ПК} \bar{w}_1''^2}{\Delta T^* - \bar{w}_2'^2 + \bar{w}_1''^2}; \\ \frac{n}{n-1} / \frac{k}{k-1} &= 1 - \frac{\zeta_{ПК} \bar{w}_1''^2}{\psi_i - \bar{w}_2'^2 + \bar{w}_1''^2} = \\ &= 1 - \frac{\zeta_{ПК}}{1 + \psi_i / \bar{w}_1''^2 - \bar{w}_2'^2}; \\ \frac{n}{n-1} &= \frac{k}{k-1} \left(1 - \frac{\zeta_{ПК}}{1 + \psi_i / \bar{w}_1''^2 - \bar{w}_2'^2} \right). \end{aligned}$$

Таким образом,

$$n = \frac{1}{1 - \frac{k-1}{k \left(1 - \frac{\zeta_{ПК}}{1 + \psi_i / \bar{w}_1''^2 - \bar{w}_2'^2} \right)}}. \quad (17)$$

Скорость на выходе из рабочего колеса равна

$$w_2' = \sqrt{\phi_2'^2 + (1 - \bar{c}_{u2})^2}, \quad (18)$$

где ϕ — коэффициент расхода.

Значение \bar{c}_{u2} с учетом отставания потока на выходе из РК рассчитывается по эмпирической формуле из монографии [5], а коэффициент расхода — из уравнения неразрывности:

$$\phi_2' = \frac{\Phi_0}{4\varepsilon_2' b_2 \tau_2}. \quad (19)$$

Коэффициент стеснения на выходе из РК

$$\tau_2 = 1 - \frac{0,7z\bar{\delta}_{лПК}}{\pi \sin \beta_{л2}}. \quad (20)$$

Параметры потока в остальных сечениях проточной части определяются аналогичным образом.

Более корректный расчет сжимаемости по сравнению с предыдущими версиями программ заметным образом влияет на параметры потока

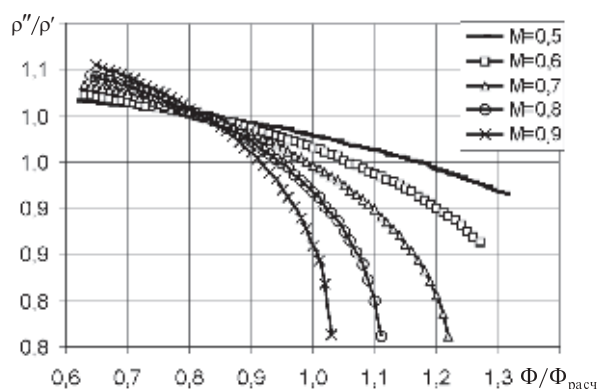


Рис. 3. Изменение плотности газа в горле межлопаточного канала по отношению к плотности перед лопаточной решеткой в зависимости от режима работы центробежной ступени

в контрольных сечениях. Особенно показательное влияние сжимаемости на уровень скоростей в горле межлопаточного канала при нерасчетных режимах. Для демонстрации выбрана центробежная ступень с параметрами: условный коэффициент расхода $\Phi_{расч} = 0,056$; коэффициент теоретического напора $\psi_T = 0,57$; $\bar{D}_{вт} = 0,32$. На рис. 3 показано изменение плотности газа в горле межлопаточного канала по отношению к плотности газа соответствующий скорости потока перед решеткой с учетом стеснения — ρ''/ρ' — в зависимости от режимного параметра $\Phi/\Phi_{расч}$ при разных условных числах Маха из диапазона $M_u = 0,5-0,9$.

Расчетные кривые на рис. 3 показывают, что в действительности плотность на этом участке проточной части меняется очень сильно, особенно при расходах больше расчетного. Например,

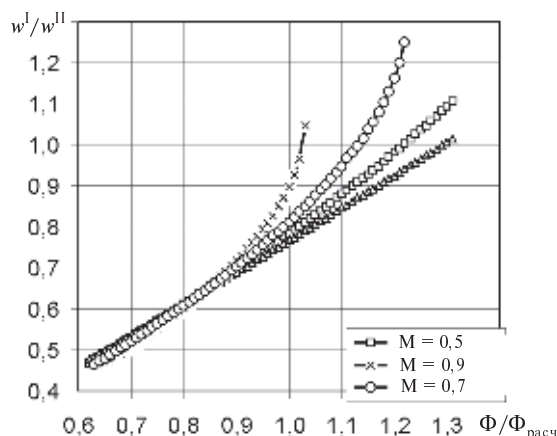


Рис. 4. Сопоставление скоростей, рассчитанных с учетом (—○—, —×—, —◇—) и без учета (—■—) изменения плотности в горле межлопаточного канала

при $M_u = 0,9$ кривая падения плотности в горле межлопаточного канала становится практически вертикальной при $\Phi/\Phi_{расч} > 1,02$.

На рис. 4 сопоставлены скорости в горле межлопаточного канала, рассчитанные по модели потерь без учета изменения плотности газа в косом срезе, и скорости с корректным расчетом плотностей газа. Эта разница оказывается существенной уже при $M_u = 0,5$. При $M_u = 0,9$ различие таково, что модель ударных потерь при высоких числах Маха потребует радикальной корректировки.

Описанный выше уточненный алгоритм расчета параметров потока в контрольных сечениях ступени принят к реализации в новой версии компьютерной программы для расчета семейства характеристик центробежных компрессорных ступеней.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Васильев, Ю.С.** Высокоэффективные центробежные компрессоры нового поколения [Текст] / Ю.С. Васильев, П.И. Родионов, М.И. Соколовский // Промышленность России.— 2000. № 10—11.— С. 42—43.
2. **Галёркин, Ю.Б.** Новое поколение модельных ступеней для газодинамического проектирования центробежных компрессоров и сменных проточных частей: часть 1 [Текст] / Ю.Б. Галёркин, К.В. Солдатова.— Компрессорная техника и пневматика.— 2010. № 2.— С. 2—11.
3. **Галёркин, Ю.Б.** Новое поколение модельных ступеней для газодинамического проектирования центробежных компрессоров и сменных проточных частей: часть 2. [Текст] / Ю.Б. Галёркин, К.В. Солдатова.— Компрессорная техника и пневматика. 2010. № 3.— С. 15—22.
4. **Попова, Е.Ю.** Оптимизация основных параметров ступеней турбомашин на основе математического моделирования [Текст]: дис. ... канд. техн. наук. / Е.Ю. Попова; СПбГПУ.— СПб., 1991.



5. Селезнев, К.П. Центробежные компрессоры [Текст] / К.П. Селезнев, Ю.Б. Галёркин.— Л.: Машиностроение, 1982.

6. Труды научной школы компрессоростроения СПбГПУ [Текст] / Под ред. Ю.Б. Галёркина.— М.: Изд-во «КХТ», 2010.

7. Шайхутдинов, А.З. Некоторые результаты совместной деятельности потребителей и производителей в области создания новых и реконструкции действующих ГПА для предприятий РАО «Газпром» [Текст] / А.З. Шайхутдинов, М.Г. Хабибуллин, И.Г. Хисамеев // Труды V междунар. симп. «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования».— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 1999.

8. Шайхутдинов, А.З. Технологические и технические решения для реконструкции компрессорных станций [Текст] / А.З. Шайхутдинов,

С.Ф. Жданов, В.В. Огнев [и др.] // Тр. XII междунар. симп. «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования».— СПб., Изд-во СПбГПУ, 2006.

9. Шайхутдинов, А.З. Технологические направления применения компрессоров на объектах ОАО «Газпром» [Текст] / А.З. Шайхутдинов, В.В. Огнев, С.Ю. Сальников [и др.] // Тр. XIII международного симпозиума «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования».— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2007.

10. Шайхутдинов, А.З. Компрессорная техника для газовой промышленности: инновации и перспективы [Текст] / А.З. Шайхутдинов, В.В. Огнев, С.Ю. Сальников [и др.] // Тр. XIV междунар. симп. «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования».— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008.

УДК 528.089.2

Н.А. Грязнов, В.В. Кириченко, Д.А. Кочкарев

МОНИТОРИНГ ФАКТОРОВ ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА НА БАЗЕ СВЕРХМАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Актуальность околоземного мониторинга

Освоение космического пространства существенно расширяет информационную и материальную вооруженность человечества, делая практически доступными технологии качественно нового уровня. Современный мир трудно представить без спутниковой связи или орбитальных навигационных систем. Несмотря на экстремальность условий существования и большие затраты по доставке оборудования, космические исследования проводятся во всех развитых странах мира, поскольку они обеспечивают ускорение прогресса в широком спектре отраслей промышленности.

Одна из важнейших задач околоземной космонавтики — как для целей освоения космоса, так и для научных астрофизических исследований — распределенный мониторинг факторов космического пространства. Среди наиболее интересных для изучения объектов следует отметить магнитное поле Земли, солнечный ветер, радиационные пояса, верхние слои атмосферы, в частности ионосферу.

Необходимость создания широкомасштабной сети датчиков обусловлена сложными трехмерными распределениями анализируемых физических параметров (напряженность магнитного поля, плотность потока частиц, интенсивность излучения в заданной области спектра, уровень радиационного фона и др.). Одновременное измерение указанных параметров в различных точках околоземного пространства позволит, как минимум, выявить наличие корреляционных явлений в периоды повышенной солнечной активности, а также составить объемные карты средних значений и флуктуаций.

Расширение инструментальной измерительной базы позволит детально исследовать уже известные явления, например вековые вариации магнитного поля, и выявить еще неизвестные закономерности, лучше понять механизмы влияния космических факторов на оптические и радиочастотные свойства атмосферы, на климат и биосферу в целом.

Ключевые проблемы создания орбитальных измерительных сетей

Создание распределенной орбитальной сети датчиков лимитируется большими финансовыми затратами, связанными с выводом на орбиту космических аппаратов, и длинными в силу жесткого регламента работ сроками разработки космической техники. Строгость подхода к разработке орбитальных средств измерения вполне логично обусловлена высокими требованиями к надежности в силу экономических соображений и ограничений технического характера (экстремальные условия существования в космическом пространстве и высокие перегрузки на начальном участке траектории).

Наиболее перспективный путь преодоления указанных ограничений — миниатюризация автоматических спутников, которая обусловлена успехами в развитии электроники и нанотехнологий [1]. Прежде всего, уменьшение массы космического аппарата позволяет снизить стоимость вывода на орбиту за счет использования технологий кластерного пуска и доставки «попутным грузом». Последний подход активно используется на стадии отработки технологий сверхмалых космических аппаратов, но едва ли стоит считать его перспективным при разработке программы их массового применения.

Создание автономных космических аппаратов микро- и наноразмерного ряда делает экономически обоснованным и технически достижимым формирование в самом ближайшем будущем многоспутниковых орбитальных группировок [2]. Данное обстоятельство позволяет снизить требования к надежности, поскольку выход из строя одиночного относительно дешевого датчика слабо влияет на общую эффективность функционирования распределенной орбитальной сети сенсоров.

Кооперация науки и образования при создании орбитальных сетей

Целью проекта, осуществляемого в ЦНИИ РТК, является разработка технологий создания сверхмалых космических аппаратов модульного типа, предназначенных для исследования факторов космического пространства, и отработка перспективных сенсорных компонентов в форме экспериментальных стендов учебных лабораторий для эффективного вовлечения в научно-технический процесс аспирантов и студентов.

Самое важное обстоятельство в рассматриваемой ситуации — это укорочение цикла разработки новых элементов космической техники до двух-трех лет, что позволит эффективно готовить квалифицированных специалистов. Уровень мотивации обучаемых определяется тем фактором, что в течение срока подготовки они смогут пройти путь от замысла до практического воплощения идей и испытаний в условиях космического полета разработанного и созданного при их участии опытного образца изделия.

Для того чтобы максимально сократить сроки и затраты на разработку, целесообразно провести унификацию платформы сверхмалого космического аппарата (наноспутник) и интерфейсов для подсоединения миниатюрных датчиков различной физической природы. При подобном подходе основная задача заключается в определении технических требований со стороны потенциальных разработчиков полезной нагрузки к параметрам аппаратов и интерфейсов для подключения датчиков.

Практическая задача — создание макета универсальной платформы, удовлетворяющей требованиям большинства разработчиков полезной нагрузки, формирование интерфейсов и протоколов обмена с сенсорной аппаратурой, а также лабораторного исследовательского стенда. Последний будет использоваться при разработке алгоритмов и программировании бортового вычислительного комплекса под различные типы датчиков, отработке миниатюрной сенсорики и ее наземных испытаниях.

Задача стратегическая — формирование кооперации разработчиков как ключевых подсистем наноспутника, так и миниатюрной сенсорной аппаратуры, используемой в качестве полезной нагрузки. С этой целью целесообразно предложить и согласовать со всеми участниками кооперации унифицированные интерфейсы и протоколы не только для сменных элементов датчиковой аппаратуры, но и для подсистем управления, связи, питания, ориентации.

В дальнейшем на созданном лабораторном исследовательском стенде в рамках образовательного процесса можно будет проводить работы по модернизации бортового оборудования, комплексированию датчиковой аппаратуры, отработке каналов связи и управления, испытанию новых элементов энергопитания, освоению обучающимися навыков обращения с подобной тех-



ников. Нацеленность лабораторной деятельности на скорейшее практическое воплощение позволит существенно обогатить процесс подготовки квалифицированных кадров в области разработки космических систем и достичь серьезных практических успехов в деле освоения космического пространства перспективными техническими средствами.

Предполагается, что в рамках такой кооперации для эффективного тестирования аппаратуры лабораторные исследовательские стенды, подобные создаваемому в рамках данного проекта, появятся во всех организациях, занимающихся разработкой подсистем сверхмалых космических аппаратов. Это, несомненно, окажет позитивное влияние на эффективность образовательного процесса при подготовке высококвалифицированных кадров в области космических систем.

Состояние дел в области разработки наноспутников

Десятки университетов по всему миру в рамках различных программ уже осуществляют разработку и изготовление сверхмалых космических аппаратов, иначе называемых наноспутниками (рис. 1).

Относительно низкая (благодаря малой массе) стоимость вывода на орбиту подобных устройств позволяет с их помощью осуществлять не только исследовательские, но и образовательные программы.

Указанные технологии предполагают использование транспортно-пусковых контейнеров для защиты аппаратов от стартовых перегрузок на первой стадии полета и решения проблемы их отделения от носителя. В силу малых размеров наноспутников изготовление индивидуальных контейнеров непрактично, поскольку не позволяет эффективно и рационально заполнить пространство за головным обтекателем ракеты-носителя. Кроме того, разработка контейнера, удовлетворяющего требованиям организаций, осуществляющих эксплуатацию космической техники, силами университетских коллективов разработчиков существенно замедлит процесс реализации решений, а его скорость — самое веское достоинство миниатюризации космических аппаратов.

Перечисленные обстоятельства привели к тому, что сами разработчики наноспутников выдвинули и активно продвигают идею стандартизации формогабаритных характеристик аппаратов, наглядно показанную на рис. 1. Все пред-

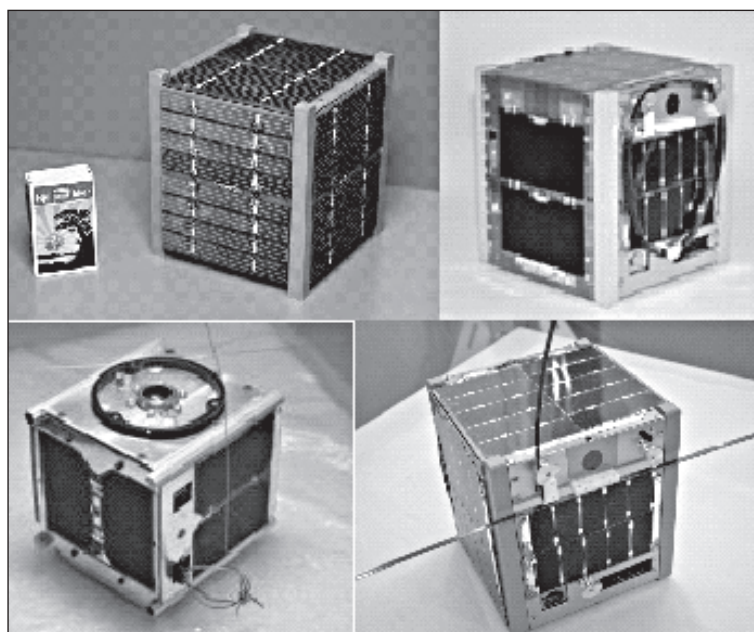


Рис. 1. Наноспутники разработки университетов Норвегии, Германии, Дании и Японии.

ставленные на нем наноспутники выполнены в формате CubeSat (кубический спутник, длина ребра которого равна одному дециметру) с четырьмя параллельными жесткими ребрами для обеспечения скольжения по направляющим транспортно-пускового контейнера [3].

Основные положения предложенной в 1999 года профессором Стэндфордского университета (США) Р. Твиггсом концепции создания нового класса сверхмалых космических аппаратов и введения стандарта CubeSat следующие [4]:

разработка спутника должна занимать короткий период (1–2 года);

стоимость создания спутника не должна превышать 50 тысяч долларов;

активное привлечение студентов, аспирантов и молодых специалистов должно происходить на всех этапах работ по проектированию, созданию и использованию спутника.

Введенный стандарт, в частности, накладывает ограничения на массу спутника и регламентирует его габариты [5]: корпус должен представлять собой алюминиевый куб $10 \times 10 \times 10$ см, общая масса которого не должна превышать 1,33 кг. Характеристики других систем, если они не выходят за допустимые пределы, разработчик выбирает по своему усмотрению. Поскольку транспортно-пусковой контейнер P-POD позволяет вывести одновременно до трех стандартных кубических спутников, обозначаемых 1U (single unit), в стандарте также предусмотрена возможность создания двойных ($10 \times 10 \times 20$ см) и тройных ($10 \times 10 \times 30$ см) спутников, обозначаемых 2U и 3U, с соответствующими возможностями увеличения массы.

Внешний вид контейнера для вывода на орбиту наноспутников, построенных по стандарту CubeSat, а также способ формирования матрицы ТПК для осуществления кластерного пуска демонстрирует рис. 2. Данный контейнер был разработан в Калифорнийском политехническом университете и получил название P-POD (poly-picosatellite orbital deployer).

В настоящее время ЦНИИ РТК совместно с РКК «Энергия» разрабатывает технический облик унифицированного контейнера для вывода на орбиту аппаратов указанного класса, который наряду с конструктивной стандартизацией сверхмалых космических аппаратов должен обеспечить стандартизацию коммуникационных каналов. Данное обстоятельство позволит существенно повысить информированность разработчиков наноспутников о поведении исследуемой аппаратуры на различных этапах вывода. Кроме того, оно обеспечит передачу в бортовой процессор аппарата непосредственно перед отделением его от контейнера необходимой навигационной информации.

Создание кластера сетей для решения проблемы экономичности запуска

Использование кластерного пуска позволяет выводить на орбиту несколько десятков наноспутников при помощи одной единственной ракеты-носителя, однако формирование распределенной сети потребует использования маршевых двигателей выводимого аппарата для разведения наноспутников по орбитам. При этом не стоит надеяться, что топливные ресурсы маршевых двигателей позволят развести их по суще-

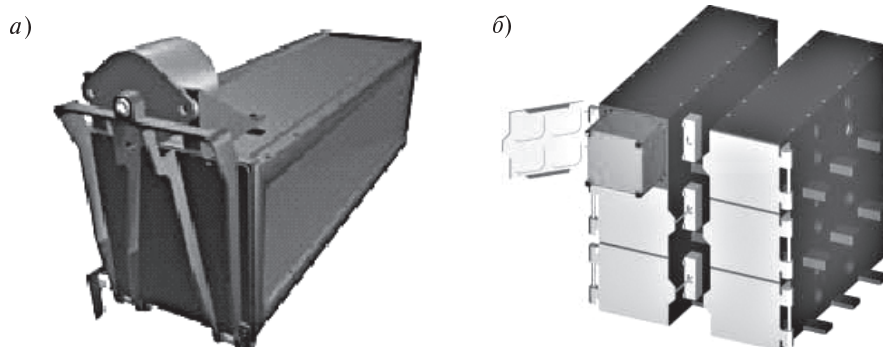


Рис. 2. Транспортно-пусковой контейнер для вывода на орбиту наноспутников, построенных по стандарту CubeSat, (а) и способ формирования матрицы контейнеров для осуществления кластерного пуска (б)



ственно удаленным друг от друга орбитам, даже учитывая возможности отделения аппаратов от носителя с большими временами задержки, исчисляемыми днями, а то и неделями.

В этом случае существует другой, интеграционный способ решения задачи, когда одновременно формируются несколько распределенных сетей по измерению различных параметров, а общая орбитальная зона покрытия разбивается на несколько секторов для размещения датчиков, в каждом из которых используется одна ракета-носитель. Современная идеология вывода наноспутников, базирующаяся на кластерных пусках и попутном выводе, вполне соответствует указанному подходу, а развитие средств вывода, в первую очередь — унифицированных транспортно-пусковых контейнеров, демонстрирует его перспективность.

Попробуем оценить, какие требования к маршевым двигателям предъявит проект одновременного формирования десяти распределенных сетей. Предположим, что с помощью одной ракеты выводятся 100 аппаратов, которые разведутся на 10 различных орбит, покрывающих приблизительно 10 % площади земной поверхности. Чтобы обеспечить необходимое покрытие, маршевые двигатели должны изменить вектор скорости выбранной группы аппаратов приблизительно на 800 м/с (десятая часть от первой космической скорости). При скорости выбрасывания реактивной струи порядка 1,5–2 км/с масса требуемого запаса топлива составит 50 % от массы перемещаемого объекта.

В силу ограничения на массу одного наноспутника кластер из десяти аппаратов даже с учетом контейнера по массе не превысит 20 кг. Учитывая реактивный агрегат с топливным баком маршевого двигателя, получаем тридцатикilограммовый блок с 20 килограммами топливного запаса. Общая нагрузка ракеты-носителя составит 500 кг, что по принятой космической классификации относится к малым спутникам.

Если запускать спутники на круговую орбиту высотой порядка 500 км, то время их существования будет ограничено торможением в остаточной атмосфере и составит примерно 1 год. Это совпадает с предполагаемым сроком активного существования аппаратов и удачно решает проблему утилизации космического мусора после завершения функционирования сжиганием аппаратов в верхних слоях атмосферы. Посте-

пенно снижаясь, наноспутники внесут элемент объемности в конфигурацию распределенной сети. Для поддержания развернутого кластера измерительных сетей потребуется 10 раз в год осуществлять запуск ракет-носителей для аппаратов класса наноспутников.

Формирование кооперации разработчиков наноспутников и датчиков

Одна из целей проекта, проводимого при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках программы развития научно-образовательных центров, — формирование кооперации высших учебных и научных заведений России для разделения труда в области создания наноспутников. Предполагается, что каждый из участников кооперации будет специализироваться в разработке одной из подсистем аппарата, используя наработки остальных организаций в качестве унифицированных изделий, покупаемых или получаемых в режиме научно-технического обмена.

На первой стадии работы по формированию указанной кооперации проведены успешные переговоры, в том числе и с разработчиками сенсорной аппаратуры: по созданию датчиков напряженности магнитного поля (ИЗМИРАН, г. Троицк), датчиков потоков элементарных частиц (РНЦ «Курчатовский институт», Москва), по созданию датчиков интенсивности солнечного излучения (ГОИ им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург) и ряда других.

Новизна подобного подхода к решению задач подготовки кадров и внедрению современных технологий в наиболее передовую и одновременно наиболее консервативную отрасль науки и техники заключается в углублении специализации. Ориентация на молодых специалистов и студентов в разработке современных наноспутников инновационно обоснована и активно реализуется во всем мире. В данном проекте предлагается сделать следующий шаг и достичь еще более высокой эффективности научного и образовательного процессов за счет унификации интерфейсов и разделения функций между разработчиками.

При таком подходе от обмена идеями можно перейти к обмену научными и техническими работами, что приведет к углублению проработки частных вопросов, касающихся отдельных подсистем СМКА. Кроме того, это даст возможность разработать модульный наноспутник с от-

крытой архитектурой, которая позволит подключить любое необходимое периферийное устройство и существенно увеличит скорость разработки новой космической техники, одновременно снизив затраты на ее создание.

Проведенные оценки позволяют сделать вывод об экономической обоснованности и технической реализуемости проекта формирования кластера распределенных орбитальных измерительных сетей на базе сверхмалых аппаратов класса наноспутника. Принципиально новый подход к формированию кооперации их разра-

ботчиков и принципов взаимодействия с образовательными учреждениями открывает хорошие перспективы для качественной подготовки специалистов в области космической техники. Создание сети лабораторных исследовательских стендов в образовательных учреждениях за счет унификации интерфейсов обеспечит условия для формирования кластера орбитальных измерительных сетей.

Статья подготовлена в ходе выполнения работ по государственному контракту на выполнение научно-исследовательских работ от 15 марта 2010 г. № 02.740.11.0529 с Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тамкович, Г.** Применение сверхмалых космических аппаратов для науки и образования [Текст] / Г. Тамкович, С. Климов, В. Ангаров, А. Зайцев // Земля и Вселенная.— № 2.— 2002. С. 86–94.

2. **Вознюк, В.В.** Космическая система радиотехнического мониторинга на основе группировки низкоорбитальных малогабаритных космических аппаратов [Текст] / В.В. Вознюк, С.А. Зайцев // Известия ВУЗов. Приборостроение.— 2005.— Т. 48, № 6.— С. 26–31.

3. **Puig_Suari, J.** CubeSat: The Development and

Launch Support Infrastructure for Eighteen Different Satellite Customers on One Launch [Текст] / J. Puig_Suari, C. Turner, R.J. Twiggs // 15th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, Utah, August 13–16, 2001.— Logan, 2001.— SSC01_VIIIb_5.

4. **Храмов, Д.А.** Миниатюрные спутники стандарта «CUBESAT» [Текст] / Д.А. Храмов // Космическая наука и технология.— 2009. Т. 15, № 3.— С. 20–31.

5. [Электронный ресурс].— http://cubesat.atl.calpoly.edu/images/developers/cds_rev12.pdf.

УДК 621.762

А.И. Рудской, В.Н. Кокорин

ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРЕССОВАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЖИДКИХ ФАЗ

Развитие рыночных отношений в России особенно обострило проблему модернизации промышленного производства, повышения его эффективности на основе создания и внедрения инновационных технологий и улучшения качества продукции.

Основные потребители высокоплотных заготовок и деталей — это отрасли автомобилестроения, машиностроения, прокатки и ряд других. Высокоплотные механические смеси могут применяться в качестве исходных заготовок при изготовлении металлопроката, получении изделий типа «фольга», в процессах интенсивного пластического деформирования по схемам динамического горячего прессования, гидроштамповки, холодной объемной штамповки, в брикетах (вторичное сырье) для процессов промышленного рециклинга твердых техногенных отходов металлургических комбинатов, в качестве деталей конструкционного назначения.

Современным потребительским рынком высокоплотных изделий востребованы детали плотностью, приближенной к теоретической, заготовки — плотностью 0,95–0,97, брикеты — плотностью более 2,5 г/см³.

Дальнейший рост объемов изготовления деталей на основе порошковых материалов, по оценке Международной федерации порошковой металлургии MPIF, будет определяться освоением производства новых науко- и трудоемких видов порошковых изделий, прежде всего — высокоплотных, и внедрением новых прогрессивных технологических процессов.

В материалах статьи рассмотрены вопросы промышленной апробации технологии прессования дисперсных металлосодержащих матери-

алов на основе железа (железный порошок и железосодержащие отходы ряда промышленных производств). Рассматриваются некоторые аспекты и особенности внедрения технологии интенсивного уплотнения увлажненных механических смесей.

Производство деталей конструкционного назначения

Технология прессования дисперсных железосодержащих порошков с использованием жидкой фазы при получении высокоплотных деталей получила положительную оценку [1]. На примере детали конструкционного назначения рассмотрим некоторые технические вопросы внедрения. В лаборатории порошковой металлургии ООО «Димитровградский завод порошковой металлургии» проведены опытно-промышленные испытания механических свойств представительной детали конструкционного назначения номенклатуры ООО «Димитровградский автоагрегаторный завод» № 2108-1006130-10 «Кольцо». Испытания проведены после операций формовки (относительная плотность, геометрические размеры, внешний вид) пареооксидирования (твердость, нагрузка разрушения — механические свойства). Для испытания были представлены детали, изготовленные по технологиям ООО «Димитровградский завод порошковой металлургии», а также по технологии [2], разработанной на кафедре материаловедения и обработки металлов давлением Ульяновского государственного технического университета и кафедре пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Предметом исследования были:

образец детали, полученный по технологии прессования увлажненных порошков ($W=15\%$); образцы детали автомобиля семейства «ВАЗ» (№ 2108-1006130-10 «Кольцо»), полученные по технологии, используемой цехом порошковой металлургии ООО «ДЗПМ» (прессование сухих порошков) в количестве пяти штук.

Сравнительный анализ порошков производился по ряду методик с использованием оборудования, а именно:

определение плотности материала детали проведено гидровзвешиванием по ГОСТ 18898-89; использовались весы лабораторные электронные модели «Sartorius L. 2200s»;

определение твердости образцов выполнено по ГОСТ 25698-98 на твердомере ТК-2М;

испытание сжимающей сосредоточенной нагрузкой проведено по ГОСТ 25503-97 на гидравлическом прессе П-10;

определение величины зерна осуществлено по ГОСТ 5639-82 на микроскопе ММР-2.

Использованы механические смеси:

для образцов ООО «ДЗПМ» — смесь № 10 ($C=0,15\ldots 0,40\%$; $Cu=1,5\ldots 2,5\%$; Fe — остальное (порошок АНС.100.29));

в опытном образце — смесь № 10 ($C=0,15\ldots 0,40\%$; $Cu=1,5\ldots 2,5\%$; Fe — остальное (порошок АНС.100.29)) с добавлением 10 % масс. доли H_2O .

Прессование производилось на прессе-автомате АПФ-100.

Отпрессованные образцы подвергались спеканию. Использована конвейерная печь спекания модели «Элино» (скорость ленты — 160 мм/мин; температурный режим $T^\circ C$ по длине ленты: 467—547—1000—1120—1120), а также печь спекания модели АСД ИМ-200, (скорость ленты 150 мм/мин; температурный режим $T^\circ C$ по длине ленты: 400—

600—900—1130—1130—1130; продолжительность спекания — 75 мин). Состав атмосферы печи спекания — эндогаз ($CO_2=0,4\text{--}1,4\%$; $O_2=1\%$; $CH_4=1,5\%$; $CO=17\text{--}22\%$; H_2 и N_2 — остальное).

Спеченные образцы подвергались пареооксидированию. Использована печь шахтная ОКБ-4100, время обработки паром составило 90 мин при $T=530\pm 10^\circ C$, охлаждение — 75 мин при $T=350^\circ C$.

Удельная плотность многокомпонентной смеси рассчитывалась по правилу аддитивности [7]:

$$\rho_{\text{алд}} = \frac{100(2,2 \text{ г/см}^3)(8,9 \text{ г/см}^3)(7,85 \text{ г/см}^3)}{A} = 7,82 \text{ г/см}^3, \text{ где}$$

$$A = 0,2(8,9 \text{ г/см}^3)(7,85 \text{ г/см}^3) + 2(7,85 \text{ г/см}^3)(2,2 \text{ г/см}^3) + 97,8(2,2 \text{ г/см}^3)(8,9 \text{ г/см}^3).$$

Произведен сравнительный анализ уровня технологических и механических свойств представленных образцов, в частности, относительной плотности:

$$\begin{aligned} \text{образец ООО «ДЗПМ»} - \rho_{\text{отн}} &= (6,67 \text{ г/см}^3)/(7,82 \text{ г/см}^3) = 0,85; \\ \text{опытный образец} - \rho_{\text{отн}} &= (7,54 \text{ г/см}^3)/(7,82 \text{ г/см}^3) = 0,97. \end{aligned}$$

Сравнительный анализ результатов испытаний показал:

соответствие требованиям, предъявляемым к деталям конструкционного назначения;

увеличение уровня механических характеристик деталей, изготовленных по технологии [2] в 1,2—1,7 раза (рис. 1—3). Данные по испытаниям механических характеристик приведены в табл. 1.

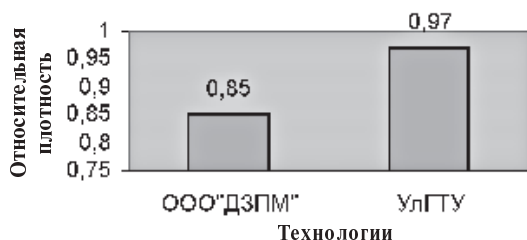


Рис. 1. Соотносительный анализ плотностей структуры

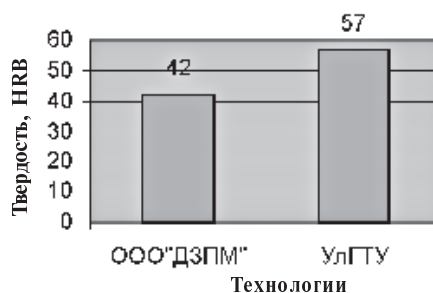


Рис. 2. Соотносительный анализ твердости структуры

Результаты опытно-промышленных испытаний, проведенных в условиях действующих производств ОАО «Димитровградский автоагрегатный завод», подтвердили высокую эффективность новой технологии интенсивного структурного уплотнения увлажненных железосодержащих порошков по сравнению с действующей при изготовлении деталей автомобиля семейства «ВАЗ». Применение нового метода интенсивного структурообразования позволило существенно увеличить механические и эксплуатационные свойства деталей конструкционного назначения и рекомендовать к внедрению в действующее производство.

Изготовление брикетов из отходов основных производств черной металлургии и машиностроения

Исходные материалы:

1) железосодержащие шламы, образуемые в процессе плавки чугуна и стали (доменные, сталеплавильные) и прокатки листа в ОАО «Орско-Халиловский металлургический комбинат» («НОСТА»).

Химический состав шламов, % масс. доли: Fe_{общ} — 45,824; FeO — 7,716; CaO — 9,226; MgO — 0,212; SiO₂ — 5,976; Al₂O₃ — 1,372; TiO₂ — 0,152; Na₂O — 0,125; K₂O — 0,18; AS — 0,378; P₂O — 0,073; Pb — 0,132; Zn — 0,462; C — 9,282; влага (H₂O) — 10–30.

Гранулометрический состав шламов: фракции (0,05–0,0063) мм — 55–60 %; (0,063–2) мм — 40–45 %).

Объем годовой переработки шламов — 100–150 тыс. т;

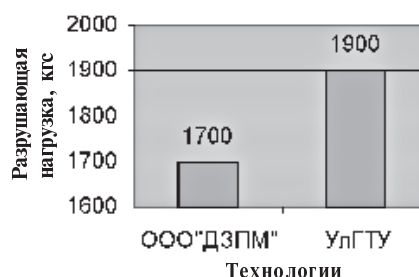


Рис. 3. Соотносительный анализ разрушающей нагрузки

2) железо-цинкосодержащие шламы, образуемые в процессе плавки стали в ОАО «Уральская сталь».

Химический состав шламов, % масс. доли: Fe — 65–75; Zn, ZnO — 10–15; влага (H₂O) — 25–30.

Гранулометрический состав шламов: фракции (0,1–1) мм — 75 %; более 1 мм — 25 %.

Объем годовой переработки шламов — 200–300 тыс. т;

3) железосодержащие шламы, образуемые в процессе прокатки листа в ОАО «Ашинский металлургический завод».

Химический состав шламов, % масс. доли: Fe — 72,2; SiO₂ — 3,3; Al₂O₃ — 1,14; MnO — 0,67; CaO — 0,46; влага (H₂O) и масло — остальные.

Гранулометрический состав шламов: фракции (0–0,1) мм — 30–50 %; (0,2–0,7) мм — 40–45 %; более 0,7 мм — остальное.

Объем годовой переработки шламов — 35 тыс. т;

Таблица 1

Результаты производственных опытно-промышленных испытаний

Параметр	Детали ООО «ДЗПМ»						Опытный образец
	По НД	1	2	3	4	5	
Операция «формование»							
Плотность, г/см ³	6,6–6,8	6,66	6,66	6,66	6,65	6,65	7,54
Внешний вид	Отсутствие трещин	Соотв.	Соотв.	Соотв.	Соотв.	Соотв.	Соотв.
Операция «спекание»							
Плотность, г/см ³ (без парафина)	—	6,57	6,57	6,56	6,60	6,56	7,57
Твердость, HRB	—	38	38	42	39	40	49
Операция «оксидирование»							
Нагрузка разрушения, кгс	—	1700	1680	1700	1600	1000	1900
Степень пароксидирования, %	—	2,25	2,14	2,15	2,23	2,24	0,80

4) железосодержащий шлам, образуемый в процессе обогащения железных руд (железородный концентрат), тонкой газоочистки доменного газа в скруббере и трубе распылителя (шлам газоочисток), грубой газоочистки в пылеуловителе (пыль колошниковая) в ОАО Липецкий металлургический завод «Свободный сокол».

Химический состав основных элементов исходных материалов приведен в табл. 2.

Гранулометрический состав представлен в табл. 3.

Объем годовой переработки шламов — 200–300 тыс. т;

5) железосодержащие шламы, образуемые в процессе плавки стали в конвертерах в ОАО «Северсталь».

Химический состав конверторных шламов, % масс. доли: $Fe\alpha$ — 35; оксиды FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 — 41–45; вода — остальное.

Гранулометрический состав шламов: (0–0,05) мм — 5 %; (0,1–0,5) мм — 90–95 %; более 0,5 мм — 2–5 %).

Объем годовой переработки шламов — 250–300 тыс. т;

6) железосодержащие шламы газоочисток конвертеров и доменных печей в ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» и железосодержащий шлам, образуемый в процессе шлифования стали ШХ15 в ОАО «Саратовский подшипниковый завод».

Химический состав шламов, % масс. доли: сталь ШХ15–30–40; абразив — 10–15; вода — 40; минеральные масла — 10.

Гранулометрический состав шламов: менее 0,1 мм — (20–25) %; (0,1–0,5) мм — (60–70) %; более 0,5 мм — остальные.

Объем годовой переработки шлама — 500 т;

7) железосодержащий шлам, образуемый в процессе шлифования стали ШХ15 (шлифование колец), обкатки и доводки шариков, суперфинишной шлифовки колец, галтовки после горячей обработки металла в ЗАО «Вологодский подшипниковый завод».

Химический состав шламов, % масс. доли:

а) шлифовального — Fe — 38–40; Cr — 0,9; Mn — 0,2; Al — 1,2; Ca — 0,8; вода — до 10; нефтепродукты — до 10; абразив — до 38;

б) обкатного — Fe — 70; Cr — 1; Mn — 2,8; вода — до 10; нефтепродукты — до 15; абразив — 4,7;

в) кузнечного — Fe и его оксиды — 81; вода — 8; остальное — примеси.

Гранулометрический состав шламов:

$0,05 \leq d_{cp} \leq 1$ мм.

Объем годовой переработки шламов: кузнечного — 100 т; шлифовального — 1500 т; обкатного — 500 т.

Основные технологические схемы получения плотных брикетов на переплав

Технологический комплекс утилизации металлургических отходов (шлам, стружка, окалина) осуществляет следующие основные опера-

Таблица 2

Состав исходных материалов, % масс. доли

Наименование	Влага	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	P	Mn	Fe	C	S	Проч.
Железородный концентрат	7–12	0,15	0,12	5,2	0,25	0,2	0,2	67	—	0,2	27,22
Колошниковая пыль	9	1,61	2,56	12,6	6,72	0,023	0,128	31,52	27,8	0,53	16,51
Шлам газоочистки	12–17	3,80	3,09	15,40	13,52	0,063	0,18	34,95	6,64	0,68	28,57

Таблица 3

Гранулометрический состав исходных материалов

Наименование составляющей шлама	Процентное содержание фракций (мм) исходного материала							
	10	10–5	5–1	1–0,4	0,4–0,2	0,2–0,1	0,1–0,05	–0,05
Колошниковая пыль	—	1,3	3,2	2,9	11,1	19,0	46,6	15,9
Шлам газоочистки	—	—	4,36	12,62	20,2	19,5	27,83	14,8



ции: сортировку и классификацию по гранулометрии дисперсных материалов; дозирование сухой твердой фракции с жидкой связующей (ЖСС); брикетирование; удаление (свободное) остаточной жидкой фазы в материале брикета на протяжении времени хранения на складе. Технологические позиции — сквозные, предусматривается использование механизации погрузочно-разгрузочных работ.

В технологический комплекс утилизации отходов входят:

- емкости — для приема исходного сырья, прошедшего классификационный (зерновой) отбор; для приготовленной ЖСС; для приема брикетов;
- установка приготовления ЖСС и система подачи ЖСС;

- система смесеприготовления (бегуны);

- системы подачи ЖСС в смеситель, а также механической смеси на брикетирование;

- система дозаторов на технологических позициях;

- погрузочно-разгрузочные и межоперационные транспортирующие устройства;

- брикетировочный валковой пресс.

Производимая продукция после ввода технологического комплекса в эксплуатацию — возвратный кусковый (в виде брикета) железосодержащий пылевидный шлам конверторного производства.

Требования к брикету — массе, геометрическим соотношениям, форме и структурному составу — устанавливаются на основе требований ГОСТ 2787-85 «Металлы вторичные. Общие требования» и корректируются с учетом оптимизации как его изготовления, так и использования (брикет транспортабельный, прочный, отсутствует склонность к его разрушению в процессе изготовления, транспортирования и хранения) на этапе технологической переработки.

Был спроектирован участок [3] для утилизации (подготовка и переработка) металлургических отходов конверторных производств на площадях ОАО «Северсталь» (г. Череповец).

Реализация данной работы обеспечивает:

- вовлечение (возврат) в сферу материального производства тонкодисперсных металлургических железосодержащих отходов (шламы);

- получение в качестве готового продукта (брикет) материалов, обладающих потребительской стоимостью, и обеспечение рентабельности производства;

- снижение расходов на шихтовые материалы и расходов на транспортные грузоперевозки; исключение расходов по складированию и хранению шламов на внешнем полигоне промышленных отходов;

- охрану окружающей среды и содействие созданию экологически безопасной среды обитания человека;

- практически безотходную технологию утилизации тонкодисперсных отходов конверторного производств ОАО «Северсталь»;

- сравнительно низкий срок окупаемости капитальных вложений при реализации (внедрении) разработанных технологий утилизации шламов (1–1,5 года).

Экономический эффект складывается (укрупненно) за счет возврата металла, входящего в конвертерный шлам, внедрения сквозной (безотходной) технологии, обеспечивающей значительное снижение транспортных расходов, а также расходов, отнесенных к хранению отходов.

При проектировании установок (модулей) переработки железосодержащих шламов газоочисток конвертеров ККЦ-1, 2 и газоочисток доменных печей ОАО «Западно-Сибирский металлургический комбинат» было предложено использовать при производстве брикетов на переплав связующее — лигносульфанат (л/с) технический порошковый (ТУ 2455-028-00279580-2004).

В экспериментальных исследованиях были использованы следующие механические смеси:

- 1) шлам сухой +2 % масс. доли (л/с) +10 % масс. доли H_2O ;

- 2) шлам сухой +2 % масс. доли (л/с) +15 % масс. доли H_2O ;

- 3) шлам сухой +2 % масс. доли (л/с) +20 % масс. доли H_2O ;

- 4) шлам сухой +2 % масс. доли (л/с) +25 % масс. доли H_2O .

Массовая доля лигносульфаната в составе механической смеси для прессования регламентирована наличием в ней серы, причем в объеме 2,5–4 и 3–4,5 % масс. доли. (ТУ 2455-028-00279580-2004). В марках Б, В, Д, Е, Ж, О, П, Т — сера отсутствует.

С целью получения качественного продукта (брикет) на переплав количество привносимой в сталь серы должно быть минимальным. Был произведен расчет [4] допустимой величины привносимой в механическую смесь серы, входящую в состав лигносульфаната марок А и М.

Использован следующий технологический регламент подготовки механической смеси для последующего брикетирования: в сухой шлам ($W = 0\%$) добавлялся лигносульфанат порошковый, смесь перемешивалась в течение 3–5 мин; в приготовленную смесь добавлялась вода (H_2O) и затем производилось перемешивание в тарельчатом смесителе до образования гомогенной структуры.

Было установлено, что смеси 1–4 имеют различную консистенцию:

смесь 1 — однородная с хорошей сыпучестью, заполнение прессформы хорошее;

смесь 2 — гранулированная; сыпучесть и заполнение прессформы — удовлетворительные;

смесь 3 — гранулированная, сыпучесть — неудовлетворительная;

смесь 4 — пастообразная, сыпучесть отсутствует.

При использовании смеси 4 наблюдалось систематическое налипание шлама на стенки смесителя; при прессовании в межинструментальный зазор вытеснялась пастообразная смесь.

На производственном участке ОАО «Западно-Сибирский металлургический комбинат» были проведены опытно-промышленные испытания по установлению режимов прессования (уплотнения) механической смеси состава: шлам сухой + H_2O + лигносульфанат (2 % масс. доли).

Использован валковый роторный брикетировочный пресс ПБВ-1000/200-80П (усилие 800кН с подпрессовщиком, изготовитель НПО «Спайдермаш»).

Влажность смеси варьировалась в диапазоне $W = 10–15\%$ масс. доли; с целью интенсификации процесса уплотнения в сухую механическую смесь добавляли подогретую ($70–80^\circ C$) воду [5]. Давление прессования устанавливалось на фиксированной величине: $q = 150$ МПа ($1,5$ тс/см²).

В табл. 4 представлены основные характеристики процесса уплотнения механической смеси.

На основе изучения закономерностей структурообразования в процессах брикетирования увлажненных механических смесей и железосодержащих техногенных отходов производств черной металлургии и машиностроения:

разработана и принята к использованию методика проектирования новых комплексных технологических процессов получения брикетов на переплав для производств ОАО «Северсталь»,

ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», ОАО «Западно-Сибирский металлургический комбинат»;

Таблица 4

Характеристика уплотнения

Влажность, % масс. доли	Прикладываемое давление, МПа	Характеристика
10	150	Брикет — прочный, при ударе (выталкивание из прессформы) не рассыпается
15	150	Брикет — прочный, при ударе (выталкивание из прессформы) не рассыпается
20	150	Брикет при ударе имеет повреждение
25	150	Образования брикета не происходит, наблюдается вытеснение пасты в зазор

внедрена в эксплуатацию на ОАО «Саратовский подшипниковый завод» промышленная установка «ВИТА-Ш» по переработке шлифовального шлама в брикеты;

общий годовой экономический эффект составил 4 473 тыс. руб.

Изготовление деталей конструкционного назначения из техногенных железосодержащих отходов на основе шарикоподшипниковой стали ШХ15

Среди шламовых техногенных железосодержащих отходов, образующихся при обработке конструкционных легированных сталей, одним из наиболее технологичных оказался шлам подшипниковой стали ШХ15. Технологичность этих отходов связана прежде всего с их исключительной однородностью по составу и свойствам, так как в основном производстве подшипниковых заводов доля стали ШХ15 и ее близких аналогов в общей массе подшипниковых сталей превышает 90 %. Эффективность изготовления порошковых изделий из отходов подшипникового производства подтверждена расчетами, приведенными в [6].

В качестве исходного материала использован шлам после обкатки шаров (ОАО «Вологодский подшипниковый завод»), подвергнутый



термической десорбции с целью удаления масел (нагрев сырого шлама в воздушной среде или среде инертного газа, выдержка 2 часа при температуре 300–400 °С).

Химический состав исходного шламового материала стали ШХ15 (после термической десорбции) в % следующий:

C	Cr	Mn	Si	N	Cu	Fe
1,17	1,49	0,3	0,2	0,3	0,2	ост.

Была установлена значительная степень окисленности десорбированного шлама. При этом в общей массе исследуемого материала оксиды (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4) составляют до 70 %, чистое железо Fe-б — 30 %, что существенно ограничивает технологические возможности деформирования. Восстановительный отжиг проводили в шахтной печи в среде водорода. Установлено выгорание углерода в материале, величина которого составляла 0,15–0,30 %.

Приготовление шихты включает следующее:

просев через набор сит с различным числом ячеек на единицу длины ситового полотна из капрона 0045–05 (0,45–0,500 мм). Для проведения анализа сита устанавливались друг над другом. Экспериментальные исследования проводились с использованием металлического порошка ПШХ15 со средним размером фракции, находящимся в пределах $0,1 < D_{\text{ср}} < 0,2$ мм, содержание которой в пробе порошка составило 70–75 % масс. доли;

смешивание металлического порошка в смесителе типа «пьяная бочка» с добавлением 1 % масс. доли порошкового графита. Продолжительность смешивания композиции до 2 часов. Для интенсификации процесса смешивания шихты в смеситель были загружены металлические шары в объеме, равном 1/3 общего объема порошка;

прессование заготовок.

Целесообразность применения процессов интенсивного уплотнения и структурирования железных порошков в присутствии жидкой фазы во многом определяется категорией сложности формы детали. Наибольший экономический эффект достигается при изготовлении высокоответственных деталей, работающих в условиях значительных эксплуатационных нагрузок, а также деталей сложной формы, имеющих значительные перепады сечений по высоте. Именно к таким деталям относится «Фильера» (деталь номенклатуры ЗАО «Системы водоочистки»,

г. Ульяновск, используемая для правки пруткового проката, — деталь III группы сложности, по классификации О.В. Романа) [7] и «Набойка» (деталь номенклатуры ЗАО «НАППА» (обувная фабрика, г. Ульяновск), IV группы сложности, имеющая отверстия в направлении прессования и переменные сечения по высоте).

Выбор схемы прессования определялся величиной приведенной толщины стенки детали (деталь «Фильера») $H/b_{\text{ср}} > 3$ и отношением высоты детали к наименьшему габаритному размеру в плане детали (деталь «Набойка») $H/d > 1$. С учетом соотношения геометрических параметров изделия были выбраны схемы прессования: двусторонняя (деталь «Фильера») и односторонняя (деталь «Набойка»). Для прессования данных изделий была спроектирована опытная оснастка.

Использовалась механическая смесь: 85 % масс. доли дисперсного металлического порошка, полученного при переработки шлама, образованного при обкатке шаров шарикоподшипников номенклатуры ЗАО «Вологодский подшипниковый завод», и 15 % масс. доли H_2O . Технологические режимы переработки обкатного шлама [6] предполагали следующее. Отделение воды и масла от шлама в барабанном агрегате термической десорбции (300–350 °С; 20 минут). Восстановление металлического порошка производилось в конвейерной печи модели СКН-8.1101/10 (ОАО «ДААЗ») для восстановительного отжига в среде водорода. Размол спека и приготовление увлажненной смеси производилось в вибрационной мельнице модели М-50-3. Прессование заготовок осуществлялось на гидравлическом прессе усилием 1600 кН, давление прессования составило 1400–1500 МПа, что соответствует V-й стадии уплотнения железного порошка. Спекание изделий производилось в конвейерной печи модели СКЗ-6.95.1 в среде эндогаза и азота.

Определены величины относительной плотности изделий (использован метод гидровзвешивания) после прессования и спекания.

Отмечен рост значений плотности (+ $\Delta\rho \leq 0,5$ %) изделий на стадии спекания. С целью установления характера изменения плотности материала по высоте изделия (интегральная плотность после спекания составила 0,98) произведено его разделение на кольцевые элементы толщиной 2 мм по схеме, приведенной на рис. 4.

Твердость материала образцов определялась на приборе Бринелля. Интегральное значение

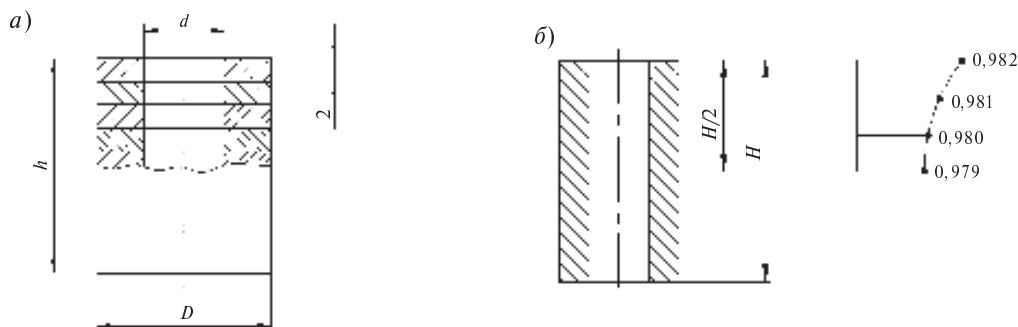


Рис. 4. Изменение плотности по высоте изделия:
а — схема разделения; б — диаграмма изменения плотности

твердости находилось в диапазоне 150–170 НВ. Уровень механических свойств свидетельствует о достижении требуемого диапазона эксплуатационных свойств изделия, относящегося к категории «сильно нагруженное».

Методика расчета технологического процесса использована в проектировании и внедре-

нии технологии интенсивного прессования увлажненных железосодержащих порошков при получении сильно нагруженных деталей конструкционного назначения номенклатуры ООО «Системы водоочистки» и ЗАО «НАППА». Годовой экономический эффект от внедрения новой технологии составил 150 тыс. руб. (в ценах 1992 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кокорин, В.Н. Прогрессивные технологии изготовления высокоплотных деталей номенклатуры ОАО «ДААЗ» [Текст] / В.Н. Кокорин, А.С. Марков, А.А. Митюшкин, В.В. Наумов // Тр. 7-й международной НТК «Математическое моделирование физических, экономических, социальных систем и процессов» — Ульяновск: Изд-во УлГУ, 2009. — 133 с.
2. Пат. 2399458 РФ. Способ прессования высокоплотных заготовок и деталей из металлического порошка в присутствии жидкой фазы [Текст] / В.Н. Кокорин // Бюл. изобр. — 2010. № 26.
3. Совершенствование технологического комплекса утилизации отходов доломитного производства и железосодержащих отходов [Текст]: отчет по НИР Е.М. Булыжев, В.Н. Кокорин [и др.] / ЗАО «Волга-Экопром». — Ульяновск, 1999. — 39 с.
4. Кокорин, В.Н. Промышленный рециклинг техногенных отходов [Текст]: учебное пособие / В.Н. Кокорин, А.А. Григорьев, О.В. Чемаева. — Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2005. — 42 с.
5. Кокорин, В.Н. Прессование деталей и заготовок с использованием механических смесей с различным фазовым состоянием [Текст]: Монография / В.Н. Кокорин. — Изд-во Ульяновск: УлГТУ, 2009. — С. 51.
6. Исследование и разработка технологического процесса подготовки шлама стали ШХ15 после обкатки готовой продукции [Текст]: отчет о НИР / Ю.Н. Берлет, В.Н. Кокорин, Б.А. Наумчев [и др.] / УПИ. — Ульяновск. — 42 с.
7. Роман, О.В. Справочник по порошковой металлургии. Порошки, материалы, процессы [Текст] / О.В. Роман, И.П. Габриелов. — Минск, 1988.

УДК 621.77.08:620.179:620.192.4

В.В. Носов, А.П. Жильцов, В.Г. Лаврин

НЕРАЗУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЗАГОТОВОК ДЛЯ ГОРЯЧЕКАТАНОЙ ПОЛОСЫ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Контроль наличия дефектов в заготовках для производства горячекатаной полосы — одно из основных условий должного уровня качества проката. Производство проката включает процесс пла-

стической деформации материала заготовки. При этом дефекты заготовки могут трансформироваться, развиваться или, наоборот, уменьшаться и даже полностью удаляться в процессе прокатки.



Предлагались различные технологии визуального, телевизионного, лазерного, ультразвукового [1], магнитного, вихретокового контроля [2, 3] готового сляба, а также акустико-эмиссионного контроля процесса кристаллизации сляба [4]. Однако наиболее часто применяется совмещенный метод органолептического визуального контроля совместно с выборочным металлографическим анализом слябов из каждой партии. Малое использование вышеперечисленных методов неразрушающего контроля обусловлено значительным усложнением технологии контроля в сочетании с недостаточным повышением ее эффективности.

Для разработки методики неразрушающего контроля дефектности заготовок было предложено использовать метод акустической эмиссии (АЭ), чья основная особенность и предпосылка высокой информативности — это связь параметров сигналов АЭ с процессами изменения структуры материала при его механическом деформировании [5]. АЭ позволяет классифицировать дефекты по таким характеристикам, как активность изменения структуры металла в локальных зонах, влияние на нее изменения действующих напряжений и, следовательно, возможности развития дефектов при прокатке.

Главной целью проводимой работы было создание методики неразрушающего контроля качества заготовок для производства горячекатаной полосы, которая бы давала возможность прогнозировать дефектность полученной полосы по результатам контроля сляба на основе метода АЭ. Были поставлены следующие задачи:

- подтвердить возможность использования метода АЭ для обнаружения нарушения макроструктуры стальных слябов;

- определить параметры диагностического нагружения слябов;

- проверить возможность интерпретации результатов контроля заготовок методом АЭ для количественной оценки дефектности полосы;

- определить наиболее информативные с точки зрения контроля дефектности полосы параметры АЭ.

Подтверждением информативности метода АЭ при контроле нарушения макроструктуры сляба стали результаты экспериментов, проведенных в 2005 году совместно с Новолипецким металлургическим комбинатом (НЛМК). Был проведен контроль фрагмента сляба с явно вы-

раженными дефектами и концентратором напряжений и целого сляба без предварительно выявленных дефектов.

Необходимое условие возникновения и регистрации акустической эмиссии материалов — нагружение объекта контроля. У пластичных металлов активность АЭ быстро увеличивается при напряжениях 10–20 % от предела текучести и достигает максимума при напряжениях 30–40 %. Было принято решение использовать для инициации сигналов АЭ в слябе напряжения, возникающие вследствие их механического нагружения собственным весом. Эти напряжения инициируют процессы разрушения структурных элементов в зонах, предрасположенных к появлению или развитию дефектов, а сигналы акустической эмиссии, зарегистрированные в момент действия этих сил, дают информацию о возможности образования и развития дефектов полосы при прокатке.

Для регистрации АЭ использовалась двухканальная диагностическая акустико-эмиссионная система СДАЭ-2, имеющая в своем составе датчики с частотным диапазоном 20–1000 кГц и персональный компьютер со стандартной программой АСОУ_16. В ходе эксперимента диагностическое нагружение сляба его собственным весом приводило к появлению максимальных растягивающих напряжений на поверхности, равных 20–30 % от предела текучести, и обеспечивало высокую вероятность регистрации сигналов акустической эмиссии. Сопоставление результатов внешнего осмотра поверхности сляба после ее высокотемпературной обработки и регистрации сигналов акустической эмиссии позволило идентифицировать один дефект (рис. 1), чье проявление и координата были спрогнозированы по результатам АЭ контроля.

С целью установления минимального уровня нагружения, достаточного для обнаружения дефектов методом АЭ, фрагмент сляба нагружался так, что максимальные напряжения на поверхности фрагмента составляли 3–4 % от предела текучести. Такой уровень напряжений оказался недостаточным для гарантированного обнаружения дефектов.

Для проведения контроля предполагается использовать нагрузку, под действием которой в слябе возникают напряжения, равные от 20 до 80 % предела текучести материала сляба. Нижняя граница значений напряжений установлена

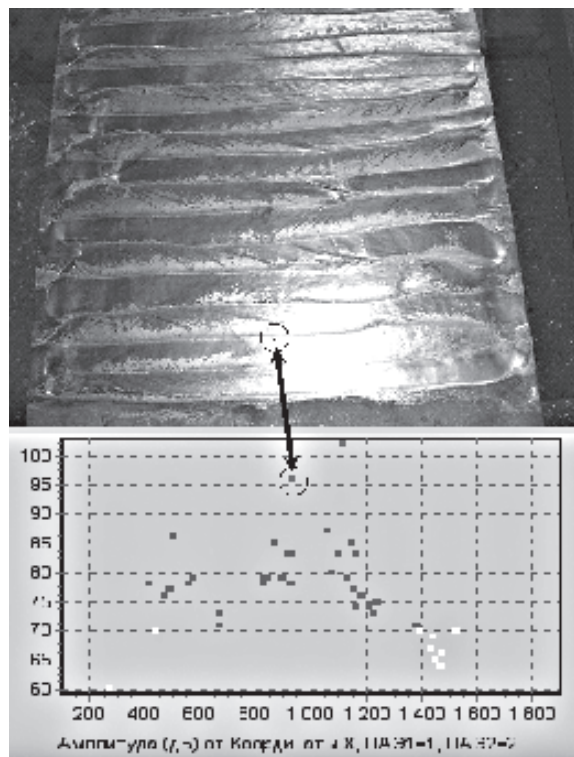


Рис. 1. Экспериментальное испытание сляба методом АЭ: а — поверхность сляба после проведения огневой зачистки; б — полученные в ходе регистрации сигналы АЭ. Стрелкой показан сигнал, указывающий на наличие дефекта с соответствующей координатой и обнаруженный в ходе огневой зачистки дефект

для гарантированного обнаружения дефектов, а верхняя — в целях исключения вероятности изменения формы сляба. Важная особенность разрабатываемой методики — использование способов нагружения остывших слябов с применением только механических нагружающих устройств, в частности нагружение сляба под действием собственного веса с использованием стандартного кранового оборудования цеха.

Чтобы установить возможность использования метода АЭ контроля сляба для прогнозирования наличия дефектов в полученной полосе по результатам контроля дефектности сляба, были проведены эксперименты на специальных образцах. Эксперименты включали диагностические нагружения образцов, их прокатку, определение дефектности полученной полосы и сопоставление результатов контроля.

Предварительно были исследованы литые образцы прямоугольной формы с отношениями

длин сторон, характерными для слябов. В качестве материала для изготовления пробной партии образцов были выбраны латунь Л63, баббит Б-83, сплав алюминия АЛ6, свинец СЗС. Нагружение проводилось на разрывной машине с ручным приводом и специальным креплением образцов, позволявшим нагружать слитки на изгиб (рис. 2), имитируя действие сил тяжести на реальный сляб при его нагружении с помощью крана. В ходе нагружения проводилась регистрация сигналов акустической эмиссии аппаратурой СДАЭ-16. Наибольший уровень корреляции был установлен для образцов из сплава баббит Б83. Литые образцы, содержащие дефекты, нагружались до появления максимальных растягивающих напряжений на поверхности, величина которых доходила до 70 % от предела текучести. В ходе нагружения проводилась регистрация сигналов АЭ.

Литые образцы были прокатаны* с суммарным обжатием до 75 % при числе проходов от трех до пяти в зависимости от интенсивности образования дефектов. Для характеристики величины суммарного обжатия образцов использовался коэффициент деформации.

Дефектность полосы оценивалась по количеству и размерам поверхностных дефектов. Оценка качества поверхности образцов проводилась визуально с использованием снимков высокого разрешения верхней и нижней поверхности полосы. На полученных снимках были отмечены дефекты протяженностью более 1 мм.

Подавляющее большинство поверхностных дефектов, обнаруженных в ходе контроля, — это поперечные и продольные трещины, сквозные разрывы и рванины на кромках. В ходе дальнейшей обработки полученных параметров дефектов из рассмотрения были исключены дефекты, не попадавшие в зону контроля методом АЭ в процессе нагружения литых образцов.

Обработка сигналов и построение корреляционных зависимостей между параметрами АЭ образцов и характеристиками дефектности прокатанных полос проводилась на основе соотношений микромеханической модели АЭ [8, 9]. В качестве параметров дефектности полос были приняты: общее количество дефектов поверхно-

* Прокатка образцов проводилась совместно с кафедрой металлургического оборудования Липецкого государственного технического университета.

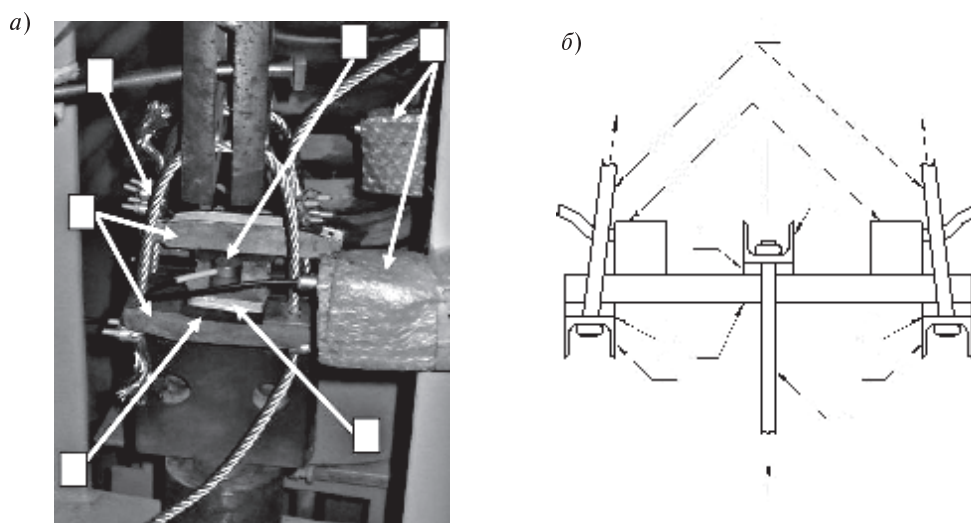


Рис. 2. Диагностическое нагружение слитка с использованием разрывной машины (а) и схема (б) нагружения (1 — слиток; 2 — преобразователи акустической эмиссии; 3 — виброизоляционный материал; 4 — тяги нагружающего устройства; 5 — опоры; 6 — предусилители)

сти образцов, суммарная длина дефектов, произведение количества дефектов на коэффициент деформации при прокатке, суммарная длина дефектов с учетом деформации при прокатке, произведение суммарной длины дефектов на коэффициент распределения напряжений вдоль продольной оси слитка, сумма условных объемов дефектов, произведения суммы условных объемов дефектов на коэффициент распределения напряжений вдоль продольной оси слитка и на квадрат коэффициента распределения напряжений вдоль продольной оси слитка. В качестве параметров сигналов АЭ использовались: коли-

чество сигналов; суммарная амплитуда сигналов; суммарное количество импульсов; суммарная длительность сигналов; суммарная энергия сигналов, сумма квадратов амплитуд; сумма амплитуд с учетом нагрузки в момент регистрации сигнала и квадрата нагрузки; сумма квадратов амплитуд с учетом нагрузки в момент регистрации сигналов и квадрата нагрузки; суммарная энергия с учетом нагрузки в момент регистрации сигнала и квадрата нагрузки. При оценке корреляции параметров дефектности полосы и параметров АЭ не учитывались сигналы продолжительностью менее 110 мкс с числом вы-

Коэффициенты корреляции между параметрами АЭ и отношением «количество дефектов/коэффициент деформации при прокатке»

Параметры АЭ	Коэффициент корреляции
Суммарная длительность сигналов	0,69
Суммарная энергия сигналов	0,80
Суммарная энергия/нагрузка	0,81
Суммарная энергия/нагрузка ²	0,81
Общее кол-во сигналов	0,71
Суммарная амплитуда	0,71
Сумма квадратов амплитуд	0,72
Сумма амплитуд/нагрузка	0,84
Сумма квадратов амплитуда/нагрузка	0,84

бросов менее 12 и длительностью максимума вступительной менее 40 мкс. В таблице приведены коэффициенты корреляции между параметрами АЭ слитков и отношением «количество дефектов/коэффициент деформации при прокатке».

Наибольшее значение коэффициента корреляции зафиксировано между количеством дефектов, деленным на коэффициент деформации, и суммой квадратов амплитуд сигналов с учетом усилия нагружения, что соответствует положением теоретической модели АЭ, взятой за осно-

ву интерпретации результатов наблюдений, и составляет 0,84.

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность использования метода АЭ для обнаружения несплошностей в стальных слябах.

Установлена корреляция между параметрами АЭ слитков и дефектностью прокатанных полос.

Определены параметры АЭ, наиболее информативные для контроля качества заготовок при производстве проката.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 1117094 SU B21 B1/00. Способ определения нарушения сплошности металла в слитках [Текст] / Д.А. Турсунов, Л.Д. Перельман, Г.В. Григорян, В.Г. Малюц / Донецкий научно-исследовательский институт черной металлургии.— № 3581111/22-02.; заявл. 14.04.83; опубл. 07.10.84.— Бюл. № 37.

2. А.с. 2006121448 RU G01N27/90. Способ и система поверхностей дефектоскопии непрерывнолитой металлической заготовки [Текст] / Ф. Мейлан (FR), Ж. Тюрон (FR), Ф. Мидруа (FR); Арселор Франс (FR).— № 2006121448/28; заявл. 2004.10.29 // WO 2005/052569 (09.06.2005).

3. Пат. С2 2343473 RU G01N27/90. Способ и система поверхностной дефектоскопии непрерывно-литой металлической заготовки [Текст] / Ф. Мейлан (FR), Ж. Тюрон (FR), Ф. Мидруа (FR); Арселор Франс (FR).— № 2006121448/28; заявл. 2004.10.29; опубл. 09.06.2005 // WO 2005/052569.

4. Пат. С1 2345355 RU G01N29/00. Способ определения неоднородности металла и устройство для его осуществления (варианты) [Текст] / С.Ф. Конев (RU), В.Г. Мазуренко (RU) / Уральский государственный технический университет —

УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (RU).— № 2007134312/28; заявл. 2007.09.17; опубл. 27.01.2009.

5. Ключев, В.В. Неразушающий контроль и диагностика [Текст]: справочник. / В.В. Ключев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев [и др.]: Под общей ред. В.В. Ключева.— М.: Машиностроение, 2003.— 656 с.

6. Добронравов, А.И. Классификация дефектов поверхности горячекатаного плоского стального проката [Текст]: Часть I. / А.И. Добронравов, Е.В. Карпов.— Магнитогорск: Магнитогорский Дом печати.— 133 с.; ил.

7. Дефекты стальных слитков и проката [Текст]: справочное издание / В.В. Правосудович, В.П. Сокуренок, В.Н. Данченко [и др.].— М.: Ин-термет Инжиниринг, 2006.— 348 с.

8. Носов, В.В. Оценка прочности и ресурса технических объектов с помощью метода акустической эмиссии [Текст] / В.В. Носов, А.И. Потапов, И.Н. Бураков // Дефектоскопия.— 2009. № 2.— С. 47–57.

9. Носов, В.В. Диагностика машин и оборудования [Текст]: учеб. пособие / В.В. Носов.— СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2010.— 242 с.

УДК 621.9.048.7

*Г.А. Туричин, И.А. Цибульский, М.В. Кузнецов,
В.В. Сомонов, Е.А. Валдайцева*

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРИСТОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ И ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Процессы лазерной сварки с глубоким проплавлением, как и родственные процессы гибридной сварки, часто сопровождаются появлением пористости в сварных швах [1]. В соответствии с современными представлениями о физической природе процессов лазерной сварки причина этого — в развитии автоколебаний парогазового канала и сварочной ванны при сварке с глубоким проплавлением [2]. Многочисленные экспериментальные результаты подтверждают, что процесс сварки с глубоким проплавлением нестационарен даже при стабилизации всех внешних факторов, влияющих на сварочную ванну [3]. В частности, высокоскоростная киносъемка лазерной сварки составных образцов из металла и оптически прозрачного материала [4] показала непрерывное изменение формы канала, квазипериодическое движение зоны с максимальной яркостью по глубине канала, а также наличие таких зон на задней стенке канала. Съемка плазменного факела также показывает его квазипериодические флуктуации [5].

Описание динамического поведения парогазового канала при лазерной и лазерно-дуговой сварке алюминиевых сплавов усложняется в связи с сильным испарением легирующих компонентов. Разные компоненты сплавов обладают различной летучестью, и поэтому при сварке с глубоким проплавлением, когда поверхность парогазового канала нагрета до температуры кипения, часть добавок улетучивается, в результате чего химический состав и механические свойства металла шва могут отличаться от состава и свойств основного материала. Экспериментальные исследования [6] испарения легиру-

ющих компонентов при лазерной сварке алюминиево-магниевого сплава показали, что в процессе сварки может испаряться и выгорать до 30 % примеси. Особенно сильно сказывается эффект избирательного испарения примесей при повторных проходах [7]. Аналогичные результаты описаны в [8, 9].

Таким образом, для детального понимания природы динамических процессов, протекающих в сварочной ванне при лазерной и лазерно-дуговой сварке алюминиевых сплавов математическая модель должна включать в себя помимо динамической модели поведения парогазового канала в сварочной ванне также и модель диффузионных процессов и процессов испарения легирующих компонентов в сварочной ванне.

Испарение легирующих элементов

Для адекватного учета влияния избирательного испарения на формирование шва при лазерной сварке необходимо количественно проанализировать баланс массы для легколетучих примесей с учетом их распределения в расплаве в силу диффузии. Учтем, что давление паров над поверхностью сплава подчиняется закону Рауля:

$$p(T) = p(T)_0 + \sum p(T)_i, \quad (1)$$

где $p(T)_0$ — парциальное давление основного элемента; $p(T)_i$ — парциальное давление i -го компонента сплава. Для каждого из парциальных давлений мы можем записать

$$p(T)_0 = \left(1 - \sum C(T)_i\right) j T^{-1/2} \exp\left(-L_0 \frac{A_0}{RT}\right);$$

$$p(T)_i = C_i \cdot j T^{-1/2} \exp\left(-L_i \frac{A_i}{RT}\right), \quad (2)$$

где C , A , L , — соответственно концентрация, атомная масса и удельная теплота испарения элемента сплава; R — универсальная газовая постоянная; T — температура смеси; j — плотность потока испарения для смеси. Парциальные давления представляют собой произведения концентраций соответствующих элементов на давления их насыщенных паров.

Для количественной оценки плотности потока испарения атомов примеси со стенки канала необходимо подробно рассмотреть баланс массы для каждого из элементов сплава в произвольном тонком слое, ограниченном двумя плоскостями, перпендикулярными оси канала.

При использовании уравнения Клапейрона для плотности примеси в паре p_i закон сохранения массы дает следующее выражение плотности потока испарения j_i атомов примеси:

$$j_i = j \frac{M}{RT^{1/2}} C_i \exp\left(-\frac{L_i A_i}{RT}\right) \frac{dV_z}{dz},$$

где M — молярная масса примеси; V_z — скорость парового потока вдоль оси z .

Для продольной скорости парового потока в парогазовом канале воспользуемся решением задачи об истечении паров из канала при сварке с глубоким проплавлением [10]:

$$V_v = \frac{\sqrt{\frac{kT}{m}} \sqrt{\frac{2\sigma}{ap_a}}}{1 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{H-z}{a}},$$

где V_v — продольная скорость парового потока; H — глубина канала; p_a — внешнее давление; координата z отсчитывается вверх от дна канала; m — масса атома компонента смеси; a — радиус канала; σ — коэффициент поверхностного натяжения; k — постоянная Больцмана.

Для более точного количественного анализа необходимо знать точное значение концентрации примеси на поверхности парогазового канала, которое может быть получено только в результате решения задачи о диффузии примесей в расплаве; при этом выведенные выше соотношения будут играть роль граничных условий.

Поле концентрации примеси в сварочной ванне будет определяться решением следующей диффузионной задачи:

$$\vec{V}(\vec{r}) \cdot \nabla C = D \Delta C; \quad (3)$$

$$-D \frac{\partial C_i}{\partial r} \Big|_{r=a} = j_i; \quad C_i \Big|_{r \rightarrow \infty} \rightarrow C_0, \quad (4)$$

где $\vec{V}(\vec{r})$ — поле скоростей расплава; D — коэффициент диффузии; r, φ_r — полярные координаты; j_i — диффузионный поток на поверхности канала; C_0 — концентрация примеси в исходном материале.

После некоторых преобразований получаем решение задачи в виде

$$C(\zeta, \eta) = C_0 + \frac{a}{\pi D} \exp\{\text{Pe} \zeta\} \times \int_{-1}^1 \frac{j_0 \exp\{-\text{Pe} \zeta'\}}{\sqrt{1-\zeta'^2}} K_0\left(\text{Pe} \sqrt{\eta^2 + (\zeta - \zeta')^2}\right) d\zeta', \quad (5)$$

где Pe — число Пекле; $\zeta = -\frac{1}{2} \left(\frac{r}{a} + \frac{a}{r} \right) \cos \varphi_r$;

$$\eta = -\frac{1}{2} \left(\frac{r}{a} - \frac{a}{r} \right) \sin \varphi_r.$$

Это выражение описывает распределение концентрации примеси в расплаве вокруг движущегося канала. Численный анализ формулы (5) при типичных для жидких металлов значениях коэффициента диффузии показывает, что изменение концентрации действительно сосредоточено в тонком слое у поверхности парогазового канала. Следует заметить, что для полного решения поставленной задачи одного выражения (5) недостаточно. Действительно, в выражение для концентрации входит поток испарения j_i , который сам зависит от поверхностной концентрации примесей (прямо ей пропорционален) и от температуры поверхности, определяющей парциальные давления компонентов сплава в парах.

Учитывая, что при фиксированной глубине температура поверхности парогазового канала практически не зависит от полярного угла, обозначив

$$B = j \frac{aM}{2RT^{1/2}} \exp\left(-\frac{LA}{RT}\right) \frac{dV}{dz}$$

и воспользовавшись методом перевала, имеем

$$C(\varphi) = C_0 - \frac{a}{\pi D} C(\varphi) \times \int_{-1}^1 \frac{B \exp\{-\text{Pe}(\zeta' - \zeta)\}}{\sqrt{1-\zeta'^2}} K_0\left(\text{Pe} \sqrt{(\zeta - \zeta')^2}\right) d\zeta' -$$

$$-\frac{a}{\pi D} C(0) \exp\{-Pe \cos(\varphi)\} \times \\ \times \int_{-1}^1 \frac{B \exp\{Pe\}}{\sqrt{1-\zeta'^2}} K_0\left(Pe\sqrt{(\zeta-\zeta')^2}\right) d\zeta'.$$

Таким образом, мы решили задачу о распределении примесей в сварочной ванне повсюду, за исключением турбулентного следа за парогазовым каналом. Более точно эту задачу можно решить с помощью численных методов.

Перенос вещества турбулентным потоком можно характеризовать турбулентным коэффициентом диффузии $D_{\text{турб}}$ ($D_{\text{турб}} \approx \Delta V$, где l — пространственный масштаб турбулентной области, ΔV — пульсации скорости расплава на расстоянии l). В этом случае поле концентрации примеси в вихревом следе определяется решением уравнения конвективной диффузии (3), при этом в качестве коэффициента диффузии берется $D_{\text{турб}}$. На границах вихревой области это решение должно совпадать с решением для области ламинарного течения, полученным выше.

Решение уравнения конвективной диффузии в вихревом следе можно записать в следующем виде:

$$C(r, \varphi, z) = C_0(r) - \delta C_m(r, \varphi, z); \quad (6) \\ \delta C_m(r, \varphi, z) = \\ = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2a}{n\pi} \int_0^{\alpha} h(\xi, z) [C_0(a) - \delta C_m(a, \xi, z)] \times \\ \times \sin\left(\frac{n\pi}{\alpha} \xi\right) d\xi \left(\frac{r}{a}\right)^{-\frac{n\pi}{\alpha}} \sin\left(\frac{n\pi}{\alpha} \varphi\right),$$

где $C_0(r)$ — распределение концентрации летучей примеси в точке отрыва по радиус-вектору, которое берется из решения ламинарной задачи; δC_m — изменение концентрации примеси вследствие турбулентности; α — угловая координата точки отрыва;

$$h(\varphi, z) = B(z) \frac{\exp\left(-\frac{L_i}{RT(\varphi)}\right)}{T(\varphi)};$$

$$B(z) = \frac{j_c}{D_{\text{турб}}} \frac{M}{N_a k \sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{\frac{2\sigma}{ap_a}} \sqrt{\frac{k}{m_{\text{Mg}}}}}{\left(1 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{H-z}{a}\right)};$$

m_{Mg} — масса атома магния; N_a — число Авогадро.

Построение динамической модели процесса гибридной сварки

Для построения динамического описания активной зоны при гибридной лазерно-дуговой сварке с глубоким проплавлением на основе механики Лагранжа необходимо в первую очередь выбрать обобщенные координаты, временная динамика которых позволит с необходимой точностью описать все интересные для приложений процессы, такие, как волновое движение поверхности парогазового канала, изменение формы и размеров сварочной ванны во времени и влияние движения канала в целом на колебания его глубины и радиуса. Также необходимо принять во внимание влияние вязких сил в расплаве, процессов испарения и давления отдачи при испарении на динамику расплава. Первый этап на этом пути — построение в явном виде функции Лагранжа, что требует знания кинетической и потенциальной энергии системы. Кинетическая энергия определяется движением расплава, и для ее расчета нужно знать поля скоростей течения. Сложность задачи приводит к необходимости использования геометрии модели и возможных упрощений при выводе уравнений движения с помощью лагранжева формализма. Положим, что глубина проплавления $H \gg a$, где a — радиус парогазового канала, и будем игнорировать отклонение стенок канала и сварочной ванны от направления оси лазерного луча. Разбиение активной зоны на части, чтобы облегчить вычисление кинетической энергии течения расплава и представить активную зону с помощью конформного отображения, схематически представлено на рис. 1.

Поскольку диапазон чисел Рейнольдса для типичных режимов сварки лежит в пределах от 10 до 100, то с достаточной точностью течение расплава может рассматриваться как потенциальное с пограничными слоями. В объеме расплава такое течение описывается потенциалом

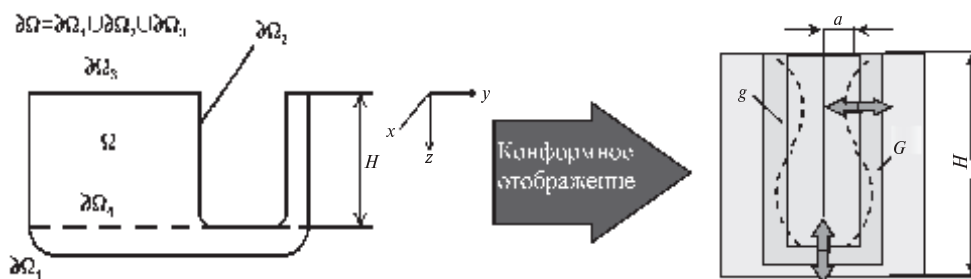


Рис. 1. Схема деления сварочной ванны и ее конформное отображение:

Ω — область расплава; $\partial\Omega$ — граница области расплава; a и A — радиусы образов соответственно парогозового канала и канала проплавления; H — глубина парогозового канала; H_p — глубина проплавления; G и g — образы поверхностей соответственно канала проплавления и парогозового канала

течения φ , удовлетворяющим уравнению Лапласа $\Delta\varphi = 0$ и граничным условиям

$$\left. \frac{\partial\varphi}{\partial n} \right|_{\partial\Omega_1} = 0; \quad \left. \frac{\partial\varphi}{\partial n} \right|_{\partial\Omega_2} = f(\theta, t),$$

где функция f определяется движением канала; n — нормаль к поверхности парогозового канала. Получить аналитическое решение задачи о потенциальном движении расплава в области, показанной на рис. 1 слева, невозможно, но, используя конформное отображение [10], можно свести задачу к определению поля скоростей в области, ограниченной двумя коаксиальными цилиндрами с радиусами A и a , и далее строить все описание в пространстве отображения. Особенно удобно это можно сделать, если в пространстве отображения представить энергию как функцию только площадей сечения отображений канала проплавления S и парогозового канала s :

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i + R_i, \quad (7)$$

где q_i последовательно принимает значения обобщенных координат $H, s_0, s_1, \dots, s_n, \dots$; L — функция Лагранжа.

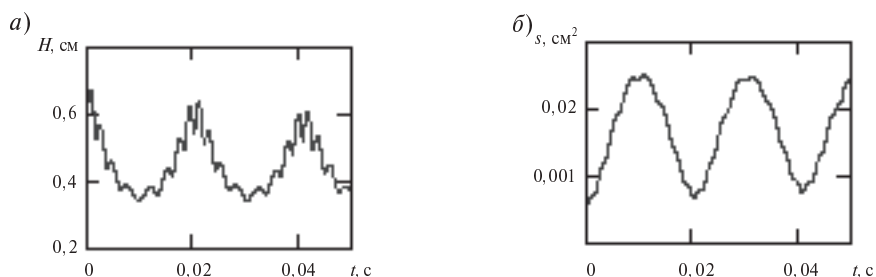


Рис. 2. Временное поведение глубины канала (a) и площади поперечного сечения (б)

Для проведения динамических вычислений система уравнений Лагранжа была «обрезана» на s_2 , и полученная система из четырех обычных дифференциальных уравнений второго порядка была решена численно методом Рунге — Кутты. Для проверки разработанной модели была проведена серия численных экспериментов по сварке малоуглеродистой стали в диапазоне мощностей от 1 до 10 кВт и при скорости сварки от 0,3 до 5 см/с. На рис. 2 приведены результаты вычислений при следующих параметрах: мощность $Q = 3$ кВт; скорость сварки $v = 1$ см/с; поперечная мода TE_{00} и фокальный радиус луча 0,015 см (86 % от полной мощности); фокусное расстояние 20 см. Начальные условия взяты из результатов моделирования лазерной сварки по стационарной модели [11].

Моделирование образования дефектов

Разработанный математический формализм был использован в системе CAE LaserCAD. Вместе с этой моделью LaserCAD теперь можно использовать для динамического анализа появления пористости. Проведенные вычислительные эксперименты показывают, что процесс гибри-



ной сварки с глубоким проплавлением является существенно нестационарным. При этом наиболее нестабильна прикорневая часть парогозового канала и канала проплавления (рис. 3).

Таким образом, по результатам моделирования при лазерно-дуговой сварке со сканированием лазерного луча (амплитуда — 0,5 мм, частота — выше 300 Гц) происходит стабилизация сварочной ванны и исчезновение прикорневых пор. Результаты моделирования были подтверждены экспериментально.

Экспериментальное оборудование

Эксперименты по сварке проводились на гибридном лазерно-дуговом технологическом комплексе. В качестве источника лазерного излучения использовался иттербиевый волоконный лазер ЛС-15 с максимальной выходной мощностью 15 кВт (рис. 4, а). Для фокусировки излучения использовалась сварочная головка YW50 фирмы Precitec с фокусным расстоянием 400 мм и фокальным диаметром 0,4 мм. Головка была снабжена однокоординатным сканатором, позволяющим доводить амплитуду сканирования луча на поверхности изделия до 2 мм при частотах сканирования до 600 Гц.

Экспериментальная установка также укомплектована источником питания дуги ВДУ-506ДК (рис. 4, б) производства фирмы «ИТС». Для подачи присадочного материала использовался подающий механизм ПДГО-601, входящий в комплект дугового модуля.

Методика проведения экспериментов

Для исследования влияния сканирования лазерного луча на процессы формирования по-

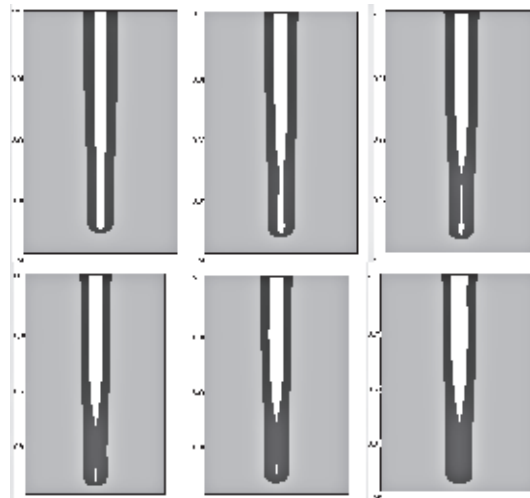


Рис. 3. Результаты моделирования динамического поведения сварочной ванны при лазерной сварке с глубоким проплавлением со сканированием (LaserCAD). Коллапс парогозового канала в нижней части. Результаты расчетов через 1 мс. Мощность излучения — 15 кВт, скорость сварки — 4 см/с, фокальный радиус — 0,2 мм, фокусное расстояние — 400 мм, материал — высокопрочная легированная сталь

ристости сваривались пластины из алюминиевого сплава В91 толщиной 6 мм. Перед сваркой пластины были зачищены до металлического блеска на ширине не менее 10 мм от стыка и соединены прихватками, выполненными с помощью лазера ЛС-15.

Для определения влияния сканирования на порообразование при лазерной и лазерно-дуговой сварке были проведено порядка 30 экспериментов. Режимы, при которых выполнялась сварка, показаны в таблице.

а)



б)



Рис. 4. Источники энергии лазерно-дугового технологического комплекса: а — иттербиевый волоконный лазер ЛС-15; б — источник тока ВДУ-506ДК

Режимы сварки

Режим	Материал	Толщина, мм	$P_{\text{л}}$, кВт	$V_{\text{св}}$, мм/с	Амплитуда сканирования, мм	Частота сканирования, Гц
1	B91	6	8	50	—	—
2	B91	6	8	40	0,2	400

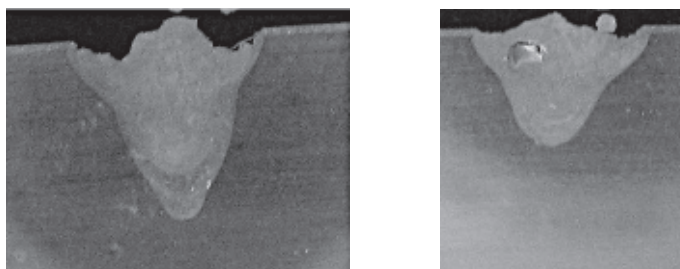


Рис. 5. Лазерная сварка алюминиевого сплава B91 (см. табл., эксперимент 2)

На рис. 5 представлены шлифы сварных соединений, выполненных соответственно в режимах 1 и 2.

Таким образом, результаты анализа формирования пористости показывают, что предотвратить ее образование можно введением сканирования.

Выводы по работе

1. Для математического моделирования порообразования при лазерной и лазерно-дуговой сварке были составлены динамическая модель поведения парогазового канала, модель диффу-

зионных процессов и процессов испарения легирующих компонентов в сварочной ванне.

2. Результаты моделирования и экспериментов подтверждают нестабильное поведение сварочной ванны и наличие пор в корне шва.

3. И математическое моделирование, и эксперименты также показывают, что сканирование лазерного излучения позволяет стабилизировать ванну расплава и предотвратить порообразование.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (ГК от 2 июля 2009 года № 02.527.11.0010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Matsunawa, A.** Porosity formation mechanism and its prevention in laser welding [Текст] / A. Matsunawa, M. Mizutani, S. Katayama, N. Seto // Welding International.— 2003. Vol. 17 (6).— P. 431–437.
2. **Lopota, V.** Theoretical description of the dynamic phenomena in laser welding with deep penetration [Текст] / V. Lopota, G. Turichin, I. Tzibulsky [at all.] / SPIE Proceedings. Series 3688.— 1999.— P. 98–107.
3. **Forsman, T.** Process instability in laser welding of aluminum alloys at the boundary of complete penetration [Текст] / T. Forsman [at all.] // Journal of Laser Applications.— 2001. October.— Vol. 13 (5).— P. 193–198.
4. **Bashenko, V.V.** Peculiarities of heat and mass transfer in welding using high energy density power sources [Текст] / V.V. Bashenko, E.A. Mitkevich, V.A. Lopota / 3-d Int. Coll. on EBW.— Lion.— 1983.— P. 61–70.
5. **Лопота, В.А.** Структура материала и его параметры в зоне действия луча при лазерной сварке с глубоким проплавлением [Текст] / В.А. Лопота, В.С. Смирнов // ФиХОМ.— 1989. № 2.— С. 104–115.
6. **Лопота, В.А.** Физико-технологические основы лазерной сварки [Текст] : Дисс. ... д.т.н. / В.А. Лопота; ЛПИ.— Л., 1990.
7. **Кривков, Б.Г.** Влияние повторных проходов на состав и свойства алюминиецинковомагнетических сплавов [Текст] / Б.Г. Кривков, А.Г. Макаров / X-я Всесоюзная конференция «Электронно-лучевая сварка».— Л., 1988.— С. 25–26.
8. **Назаренко, О.К.** Электронно-лучевая сварка [Текст] / О.К. Назаренко [и др.]— Киев: Наукова думка, 1988.
9. **Децик, Н.Н.** Испарение легирующих элементов при электронно-лучевой сварке [Текст] / Н.Н. Децик, В.Н. Децик / X-я Всесоюзная конференция «Электронно-лучевая сварка».— Л., 1988.— С. 27–28.



10. Туричин, Г.А. Теоретические основы и моделирование лучевой сварки металлов с глубоким проплавлением [Текст]: Дисс ... д.т.н. / Г.А. Туричин; СПбГТУ.— 2000.

11. Лопота, В.А. Модель лазерной сварки с глубоким проплавлением для применения в технологии [Текст] / В.А. Лопота, Ю.Т. Сухов, Г.А. Туричин // Известия академии наук. Сер. физическая.— 1997.— Т. 61. № 8.— С. 1613–1618.

УДК 621.9.048.7

*Г.А. Туричин, И.А. Цибульский,
М.В. Кузнецов, В.В. Сомонов*

ГИБРИДНАЯ ЛАЗЕРНО-ДУГОВАЯ СВАРКА МЕТАЛЛОВ БОЛЬШИХ ТОЛЩИН

В современной России стоят задачи модернизации и дальнейшего развития ключевых отраслей промышленности — авиастроения, судостроения, трубопроводного транспорта, что требует создания оборудования и технологий, обеспечивающих сварку металлов больших толщин с минимальными сварочными деформациями, высоким качеством формирования сварного шва и обеспечением требуемых механических свойств соединения.

В этой области сварки ключевыми вопросами являются обеспечение качества (отсутствие дефектов, равнопрочность) сварных соединений новых материалов, повышение эффективности и производительности процесса сварки. Чрезвычайно перспективна для решения перечисленных задач технология гибридной лазерно-дуговой сварки (ГЛДС), предложенная в 80-х годах прошлого века [1–4]. При гибридной лазерно-дуговой сварке на обрабатываемое изделие направляют лазерный луч и одновременно в зоне его теплового воздействия возбуждают дугу между электродом и изделием. Дуговая и лазерная сварки дополняют друг друга своими преимуществами и взаимно нивелируют недостатки, присущие каждому из методов сварки. При этом процесс гибридной сварки не является простым сложением дугового и лазерного процессов, он характеризуется существенным сжатием дугового столба, значительно более высокой стабильностью сварочной ванны и более высоким КПД по сравнению с дуговой сваркой, значительно более мягким термическим циклом и существенным снижением требова-

ний к зазорам и точности сборки по сравнению с лазерной сваркой.

До недавнего времени в качестве лазерного источника применялись мощные CO_2 лазеры, генерирующие излучение с длиной волны 10,6 мкм. Взаимодействие с металлами излучения данной длины волны сопровождается возникновением оптического разряда, что оказывает существенное влияние на параметры сфокусированного луча, долю поглощенной энергии в мишени и плазме в зоне взаимодействия.

Существенно по-иному происходит взаимодействие с мишенью лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм. При воздействии излучения с такой длиной волны порог интенсивного плазмообразования лежит существенно выше технологически необходимых значений интенсивности лазерного излучения. Однако мощные лазерные установки с такой длиной волны отличались низким качеством излучения и малой надежностью. Лишь в последние годы появились технологические твердотельные лазеры, волоконные и дисковые, обеспечивающие непрерывное излучение мощностью до 30 кВт, обладающие высоким качеством луча и высокой надежностью, что открывает перспективы промышленного внедрения технологий лазерно-дуговой сварки. Использование гибридной лазерно-дуговой сварки осложняется тем, что этот процесс часто сопровождается появлением пористости и формированием корневых пиков в сварных швах [5]. Согласно современным представлениям о физической природе процессов гибридной сварки причиной этого является раз-

витие автоколебаний парогазового канала и сварочной ванны при сварке с глубоким проплавлением [6], что подтверждается многочисленными экспериментальными результатами [7–21].

Вычислительные эксперименты, проведенные с помощью системы инженерного компьютерного анализа LaserCAD [22], подтвердили, что процесс гибридной сварки с глубоким проплавлением существенно нестационарен. Наиболее нестабильны прикорневые части парогазового канала и канала проплавления. Застабилизировать сварочную ванну можно введением сканирования лазерного луча с небольшой (до 0,5 мм) амплитудой и высокой (свыше 300 Гц) частотой сканирования. При отсутствии такой стабилизации в результате коллапса парогазового канала возможно формирование пор большого диаметра и корневых пиков, хорошо заметных на шлифах, изломах сварных образцов и результатах математического моделирования динамического поведения сварочной ванны (рис. 1 и 2).

Оборудование и материалы

Технологические эксперименты проводились на базе гибридной лазерно-дуговой сварочной установки, созданной в ходе выполнения проектов ГК от 24 сентября 2007 г. № 02.527.11.9001 и ГК от 02 июля 2009 г. № 02.527.11.0010 Министерства образования и науки РФ (рис. 3, 4). В качестве источника излучения использовались иттербиевые волоконные лазеры ЛС-5 и ЛС-15 с максимальной выходной мощностью 5 и 15 кВт.

Излучение транспортировалось по волоконному кабелю к оптической сварочной головке лазерно-дугового модуля. Для фокусировки излучения использовалась сварочная головка YW50 фирмы Precitec с фокусным расстоянием 400 мм и фокальным диаметром 0,4 мм. Головка была снабжена однокоординатным сканатором, позволяющим достигать амплитуды сканирования луча на поверхности изделия до 2 мм при частотах сканирования до 600 Гц.

Экспериментальная установка также укомплектована источниками питания дуги ВДУ-506ДК и ВДУ-1500 производства фирмы «ИТС», лицензированными для сварки трубопроводов. Данные источники питания обеспечивают в режиме MIG-MAG (плавящийся электрод в среде инертного или активного защитного газа) требуемые значения наклона внешней характеристики. Для подачи присадочного материала использовался подающий механизм ПДГО-601, входящий в комплект дугового модуля.

В ходе экспериментов проплавлились и сваривались в стык плоские образцы толщиной 2, 4, 6, 8, 10, 12 и 15 мм из сталей Ст3, 25Г2С, 10Г2ФБЮ, 12Х18Н9Т и алюминиевых сплавов 1424 и В91. Сварка осуществлялась прямолинейными стыковыми швами в нижнем пространственном положении. Для защиты сварочной ванны и металла шва использовались аргон, двуокись углерода сварочная и их смеси.

В качестве присадочного материала в экспериментах использовались порошковые проволо-

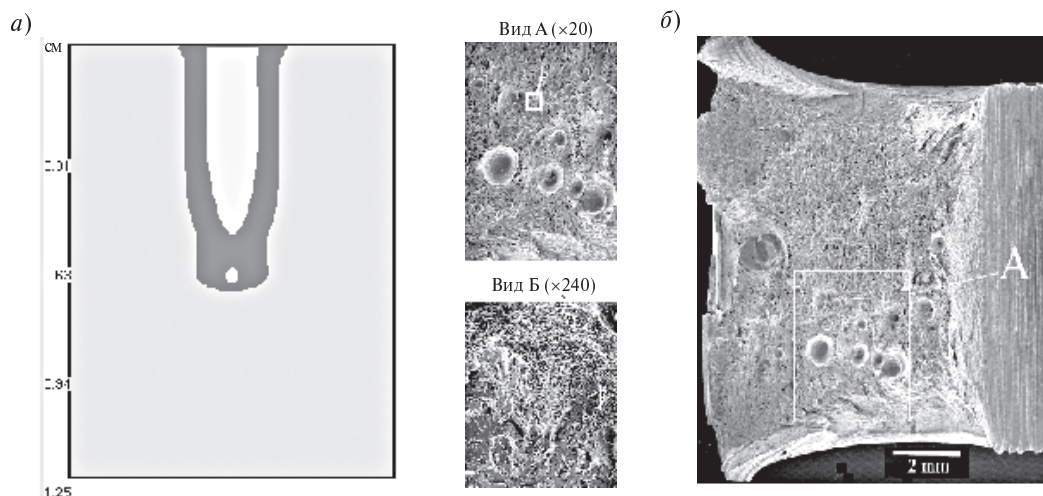


Рис. 1. Моделирование появления пористости, связанной с периодическими коллапсами парогазового канала, (а) и экспериментально наблюдаемые поры при лазерной сварке трубных сталей (б)



ки с повышенным содержанием раскислителей и флюсующими материалами, способными создавать на поверхности сварочной ванны жидкие пленки, препятствующие проникновению газов (кислорода и азота) в расплавленный металл, и сплошные проволоки из алюминиевых сплавов.

Качество всех сварных швов оценивалось визуально по их внешнему виду и на основании металлографических исследований поперечных шлифов. Определялись глубины проплавления и другие параметры геометрии шва.

Результаты экспериментов

Проведенные испытания экспериментального комплекса показали его высокие технологические возможности. При совместном использовании лазера мощностью до 5 кВт и дугового модуля с плавящимся электродом получено проплавление в стыковом соединении стали толщиной не менее 8 мм и заполнение зазора 0,5 мм и более при высокой плотности шва (см. таблицу).

В проведенных опытах объем наплавленного присадочного металла составлял около 30 % от общего объема металла сварочной ванны.

С помощью проведенных экспериментов при более высокой мощности лазерного излучения было установлено влияние скорости сварки, энергии дуги и присадочного материала на сварочный процесс и соответственно на формирование шва в условиях лазерно-дугового сварочного процесса.

Проведенные металлографические исследования сварных швов на трубных сталях, получен-

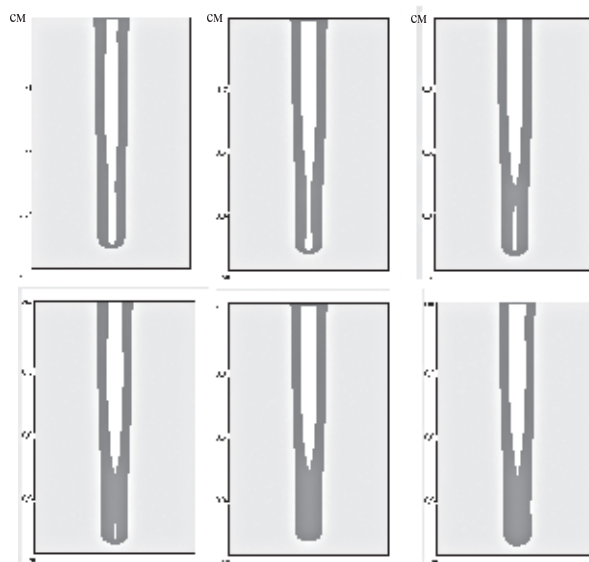


Рис. 2. Результаты моделирования с использованием LaserCAD динамического поведения сварочной ванны при лазерной сварке с глубоким проплавлением. Коллапс парогазового канала в нижней части. Результаты расчетов через 1 мс. Мощность излучения — 15 кВт, скорость сварки — 4 см/с, фокальный радиус — 0,2 мм, фокусное расстояние — 400 мм, материал — высокопрочная легированная сталь

ных с помощью разработанного гибридного лазерно-дугового технологического процесса, показали, что при правильном выборе параметров технологического процесса можно получить мелкозернистую структуру металла сварного шва и узкую зону термического влияния (рис. 5). Подбор присадочного материала при сварке среднелегированных сталей позволяет получить значе-

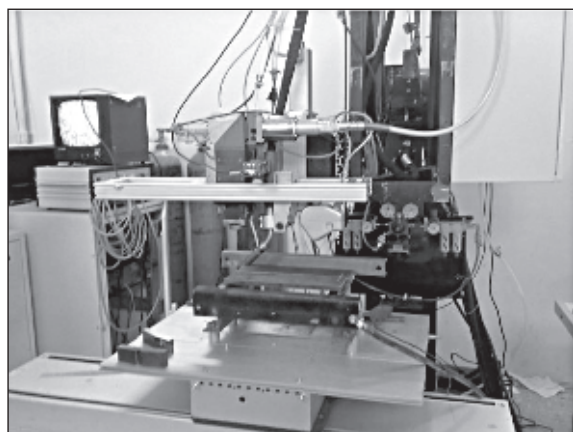


Рис. 3. Лазерно-дуговой гибридный технологический комплекс

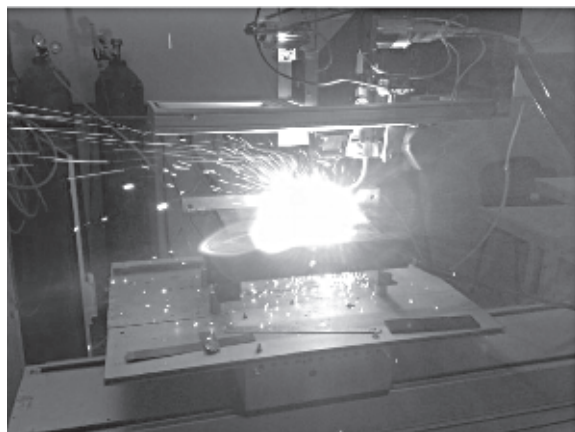


Рис. 4. Процесс лазерно-дуговой сварки

Режимы сварки

Номер режима	Мощность излучения лазера, Вт	$V_{св}$, мм/с	Ток дуги, А	Напряжение, В	$V_{пп}$, мм/с	Площадь шва F , мм ²	Глубина проплавления S , мм	Зазор в стыке, мм	Кол-во наплавл. металла, %
3	4500	20	0	0	0	7,8	6,65	0	0
4	4500	14	0	0	0	11,28	7,0	0	0
7	4500	15	80	22	68,33	13,95	7,05	0,5	29,5
8	4500	8,5	80	19	68,33	23,4	8	0,75	31,1

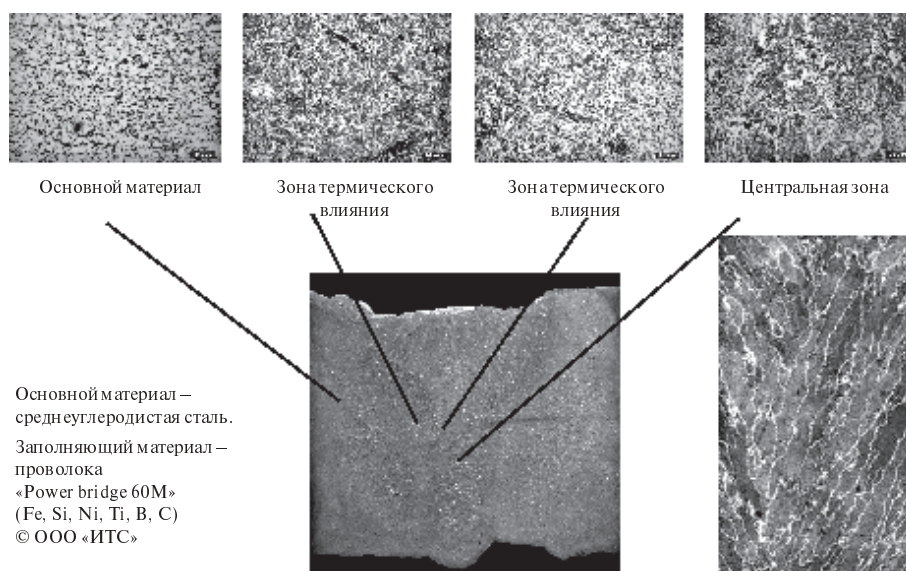


Рис. 5. Микроструктура сварного соединения

ния механических свойств металла сварного соединения, не уступающие свойствам основного металла. Проведенные технологические исследования показали, что проплавляющая способность созданного технологического комплекса дает возможность сваривать за один проход металл толщиной до 15 мм при скорости сварки 3 м/мин.

Проведенные технологические исследования показали, что с помощью гибридной технологии можно вести сварку по зазору до 2 мм. Это открывает возможности практического использования разработанной технологии (рис. 6).

Высокое качество формирования сварного шва возможно в широком диапазоне скоростей сварки (рис. 7).

Использование ГЛДС при сварке встык прямых труб большого диаметра для газо- и нефтепроводов позволяет получить первый, «корневой» шов глубиной до 15 мм за один проход (рис. 8), что при использовании сварки под флюсом для заполнения остающейся разделки дает швы, показанные ниже (рис. 9).

Проведенные исследования показали, что и стационарная, и динамическая модели позво-



Рис. 6. Сварка трубной стали толщиной 15 мм на скорости 3 м/мин (мощность лазерного излучения) 14,5 кВт мощность электрической дуги (кВт, скорость подачи проволоки) 14,5 м/мин при различных величинах зазора (а — 0,5 мм, б — 1 мм, в — 2 мм)

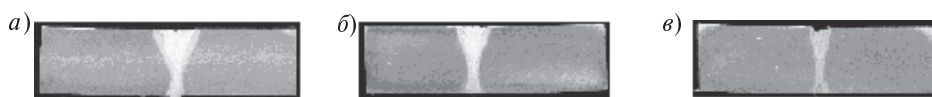


Рис. 7. Сварка трубной стали толщиной 15 мм
(мощность лазерного излучения — 14,5 кВт, мощность электрической дуги — 7 кВт)
при скорости подачи проволоки 14,5 м/мин, величине зазора 0,5 мм
и разных скоростях: *а* — 1,2 м/мин, *б* — 2,0 м/мин, *в* — 3,0 м/мин

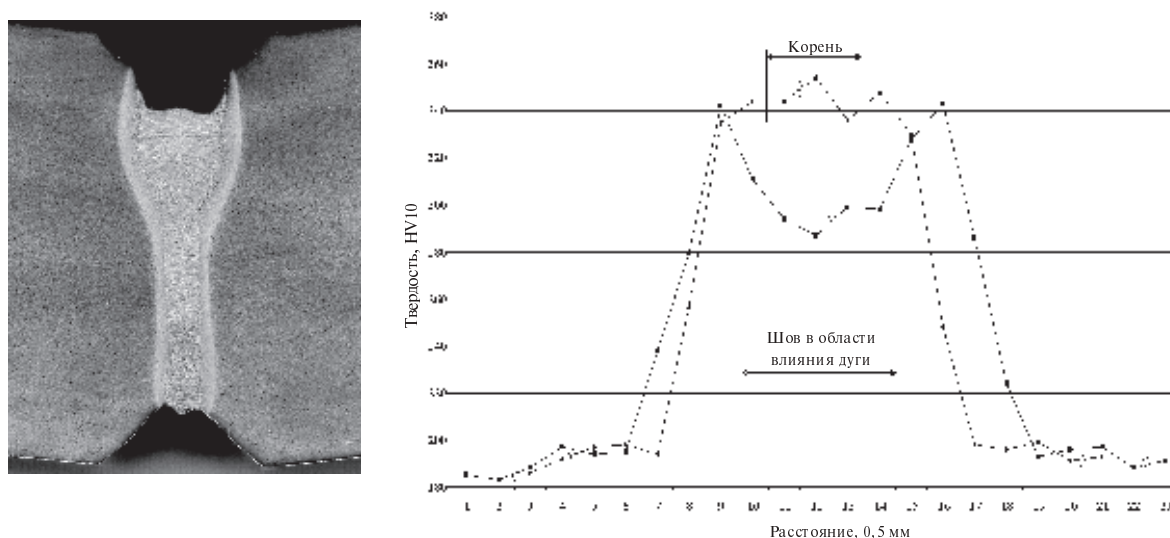


Рис. 8. Сварные соединения трубных сталей толщиной 24 мм. Корневой шов глубиной 15 мм
(материал — сталь класса Х80; заполняющий материал — металлопорошковая проволока Powerbridge;
скорость сварки — 3 м/мин; мощность лазерного излучения — 12,5 кВт; мощность дуги — 7 кВт;
ударная вязкость (−40 °С) — 200 Дж)

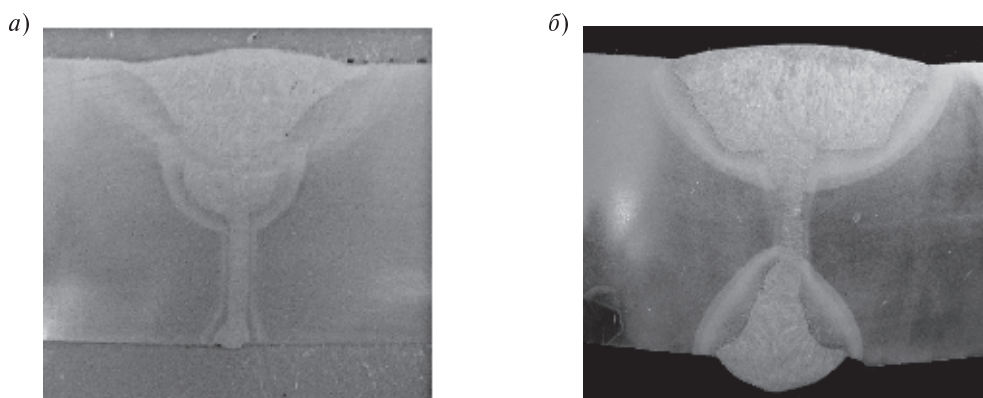


Рис. 9. Сварные соединения трубных сталей толщиной 24 мм
(выполнение корневого шва лазерно-дуговой сваркой,
а последующих заполняющих проходов — автоматической сваркой под слоем флюса):
а — заполнение V-образной разделки, *б* — заполнение X-образной разделки

ляют с высокой точностью моделировать лазерную и гибридную лазерно-дуговую сварку, использующие мощные волоконные лазеры. Нестабильное поведение парогазового канала при сварке волоконным лазером связано с величиной радиуса луча и распределением интенсивности по его сечению. Выбор параметров режима сварки и сканирования луча может стабилизировать поведение ванны расплава при гибридной сварке, а влияние лазерного излучения стабилизирует поведение ванны расплава по сравнению с МАG-сваркой. Использование в качестве заполняющего материала металлопорошковой проволоки и сканирование луча позволяют сваривать трубную сталь толщиной до 15 мм с зазором до 2 мм без потери качества.

Лазерно-дуговая сварка — сложный многофакторный процесс, характеризующийся не только параметрами, которые присущи лазерной (длина волны, мощность и качество лазерного излучения, размеры и положение сфокусированного луча) и дуговой (ток и напряжение на дуге, вылет электрода, длина дуги, скорость подачи проволоки) сваркам, но и специфическими параметрами, характерными именно для их совместного воздействия, например положением лазерного луча относительно дугового пятна на поверхности изделия. Кроме того, важны состав газовой защитной атмосферы, химический состав присадочного материала, подготовка свариваемых кромок под сварку.

В ходе данной работы были проведены исследования влияния некоторых из перечисленных параметров на геометрию зоны проплавления. Установлено, что в изученных диапазонах параметров возможно получение зон проплавления, обеспечивающих малый удельный энергозатрат, достаточный для образования монолитного сварного соединения. При этом зона

термического влияния, которая может быть источником зарождения таких дефектов, как трещины, достаточно узка и при толщине сваренных образцов 8 мм не превышает 1,0–1,5 мм.

Показана возможность формирования однопроходного сварного шва, при котором присадочный материал проникает на всю глубину провара.

Фактором, способствующим проникновению присадочного материала в корень шва, может стать сканирование лазерного луча внутри сварочной ванны. Для выявления оптимальных частот сканирования в ходе данной работы с помощью системы инженерного компьютерного анализа LaserCAD были изучены амплитудно-частотные характеристики колебаний пароплазменного факела, истекающего из зоны взаимодействия луча со свариваемым материалом. Показано существование характерных частот колебаний в диапазоне десятков, сотен и тысяч герц, совпадающих с частотами перемещения жидкой фазы внутри сварочной ванны и зоны взаимодействия лазерного луча по передней стенке парогазового канала.

Возможность формирования металла шва за счет присадочного материала в сочетании с возможностью регулируемого (с помощью сканирования) участия в этом процессе основного металла обеспечивают получение его требуемых механических свойств.

Чтобы предотвратить формирование пор и растрескивание газов (азот, кислород) в жидком металле, уменьшить разбрызгивание металла и в конечном счете обеспечить качество сварного соединения, процесс сварки следует вести в среде защитных газов. В качестве таких газов целесообразно использовать аргон или смеси аргона с небольшими добавками углекислого газа (5–10 %).

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (ГК от 02 июля 2009 года № 02.527.11.0010)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 1547172 Великобритания, МКИ В23К 26/00, 9/00. Methods and apparatus for cutting, welding, drilling and surface treating [Текст] / Steen W.M.— Оpubл. 06.06.79.
2. Пат. 1600796 (доп. к пат. 1547172) Великобритания, МКИ В23К 26/00, 9/00. Improvements in methods and apparatus for cutting, welding and surface treating [Текст] / Steen. W.M.— Оpubл. 21.10.81.
3. Пат. 4167662 США, МКИ В23К 9/00. Methods and apparatus for cutting and welding [Текст] / Steen W.M.— Оpubл. 11.09.79.
4. Пат. 2813642 Германия, МКИ В23К 26/00. Verfahren und vorrichtung zur bearbeitung von werkstucken mittels eines laserstrahls [Текст] / Steen W.M.— Оpubл. 04.10.79.
5. Matsunawa, A. Porosity formation mechanism and its prevention in laser welding [Текст] / A. Matsunawa, M. Mizutani, S. Katayama, N. Seto // Welding



International.— 2003.— Vol. 17 (6).— P. 431–437.

6. **Lopota, V.** Theoretical description of the dynamic phenomena in laser welding with deep penetration [Текст] / V. Lopota, G. Turichin, I. Tzibulsky [at all.] // Bellingham/Wash, SPIE, 1999. (SPIE Proceedings Series 3688). P. 98–107.

7. **Forsman, T.** Process instability in laser welding of aluminum alloys at the boundary of complete penetration [Текст] / T. Forsman, J. Powell, C. Magnusson // Journal of Laser Applications.— October 2001.— Vol. 13, Issue 5.— P. 193–198.

8. **Bashenko, V.V.** Peculiarities of heat and mass transfer in welding using high energy density power sources [Текст] / V.V. Bashenko, E.A. Mitkevich, V.A. Lopota / 3–d Int. Coll. on EBW.— Lion.— 1983.— P. 61–70.

9. **Лопота, В.А.** Структура материала и его параметры в зоне действия луча при лазерной сварке с глубоким проплавлением [Текст] / В.А. Лопота, В.С. Смирнов // ФизХОМ.— 1989.— № 2— С. 104–115.

10. **Matsunawa, A.** Dynamics of keyhole and molten pool in laser welding [Текст] / A. Matsunawa, Jong-Do Kim, Naoki Seto [at all.] // Journal of Laser Applications.— December 1998.— Vol. 10, Issue 6.— P. 247–254.

11. **Zuev, I.V.** Self-oscillations under action of high density energy source on materials [Текст] / I.V. Zuev, S.V. Selischev, V.I. Skobelkin // Physics and Chemistry of Material Treatment.— 1980.— № 6.— P. 3–7.

12. **Углов, А.А.** Автоколебательные процессы при воздействии концентрированных потоков энергии [Текст] / А.А. Углов, С.В. Селищев.— Москва: Наука, 1987.— 152 с.

13. **Мирзоев, Ф.Х.** Испарительно-капиллярная неустойчивость в глубокой парогазовой каверне [Текст] / Ф.Х. Мирзоев // Квантовая электроника.— 1994.— Т. 21 (2).— С. 147–150.

14. **Туричин, Г.А.** Гидродинамические аспекты устойчивости парогазового канала при лучевых видах сварки [Текст] / Г.А. Туричин // ФизХОМ.— 1996.— № 4.— С. 74–81.

15. **Semak, V.V.** Melt pool dynamics during laser welding [Текст] / V.V. Semak, J.A. Hopkins, M.H. McCay, T.D. McCay // J. Phys. D: Appl. Phys., 1995.— Vol. 28.— P. 2443–2450.

16. **Lee Jae Y.** Mechanism of keyhole formation and stability in stationary laser welding [Текст] / Lee Jae Y.; Ko Sung H.; Farson Dave F [at all.] // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002.— Vol. 35.— P. 1570–1576.

17. **Kaplan, A.** A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile [Текст] / A. Kaplan // J. Phys. D: Appl. Phys. 1994.— Vol. 27.— P. 1805–1814.

18. **Beyer, E.** A Tool for Efficient Laser Processing [Текст] / E. Beyer, M. Dahmen, B. Fuerst et. all. Proceedings of 14 Int. Congress on application of lasers — ICALEO-95.— San Diego, USA.— P. 1035–1039.

19. **Schulz, B.** Powerful Features for LBW Including Theoretical Aspects [Текст]— Detroit, USA, Orlando, Fla.: LIA.— 1996. P. 1–9

20. **Туричин, Г.А.** Теоретические основы и моделирование лучевой сварки металлов с глубоким проплавлением [Текст]: дисс. ... д.т.н.— СПб, 2000.— 299 с.

21. **Лопота, В.А.** Модель лазерной сварки с глубоким проплавлением для применения в технологии [Текст] / В.А. Лопота, Ю.Т. Сухов, Г.А. Туричин // Известия академии наук. Сер. Физическая.— Т. 61. № 8.— 1997.— С. 1613–1618.

22. **Туричин, Г.А.** Моделирование динамического поведения сварочной ванны при лазерной и гибридной сварке с глубоким проплавлением [Текст] / Г.А. Туричин, Е.А. Валдайцева, Е.Ю. Поздеева [и др.] // Автоматическая сварка.— 2008. № 7.

УДК 621.793.74:621.365.5

В.Я. Фролов, Е.А. Смирнова, Б.А. Юшин

ПРИМЕНЕНИЕ УСКОРЕННОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Технологии плазменного напыления, разработанные в научно-учебном технологическом центре «Электротехнология» СПбГПУ, успешно применяются для создания защитных покрытий различного класса на новых изготавливаемых деталях и для восстановления

изношенных изделий. Воздушно-плазменное напыление позволяет наносить покрытия из металлов, которые обычно подвергаются значительному окислению. Однако самофлюсующиеся покрытия требуют дополнительного нагрева.

Последние исследования позволили получить с помощью ускоренного индукционного нагрева улучшение качества наносимого покрытия из самофлюсующихся и некоторых других материалов.

Исследование свойств и характеристик воздушно-плазменных покрытий, определение адгезии, твердости, исследование структуры покрытий и т. д. стали отправной точкой для разработки аппаратуры и технологических процессов, обеспечивающих повышение прочности сцепления покрытий и основы.

Покрытие, полученное в результате напыления, по своей структуре является в значительной степени пористым. Пористость его можно в некоторых случаях эффективно использовать. Однако наиболее широкое применение находят плотные покрытия. Другая проблема — повышение прочности сцепления покрытия и подложки. Наряду с существующими методами повышения качества покрытия (пропитка покрытий специальными составами, окрашивание, поверхностное оплавление, механическая обработка, ультразвуковое упрочнение и др.) способ последующего индукционного оплавления покрытия предполагает нагрев одновременно покрытия и основы под действием вихревых токов, что приводит к улучшению как качества самого покрытия, так и к увеличению адгезии между покрытием и подложкой. Этот способ имеет ряд преимуществ, поскольку позволяет производить оплавление материалов в узкой зоне сцепления подложки с покрытием без нагрева самой заготовки.

Метод индукционной обработки заключается в следующем: обрабатываемая деталь подвергается ускоренному поверхностному высокочастотному нагреву, при котором вследствие наличия границы раздела сред с разной электропроводностью основная мощность выделяется не на поверхности заготовки, а на границе подложки. На поверхности раздела двух сред происходит частичное отражение электромагнитной волны

$$\overline{E} = \overline{J}\rho;$$

$$\overline{H} = \overline{B}/\mu,$$

где $J, \text{А/м}^2$, — плотность электрического тока; ρ , Ом·м, — удельное электрическое сопротивление; μ , Гн/м, — магнитная проницаемость.

При этом ни напряженность электрического поля E , В/м, ни напряженность магнитного поля H , А/м, не должны претерпевать разрыва на границе двух сред.

Напротив, плотность тока J и магнитная индукция B , Тл, могут меняться скачком. Но, как это видно из закона электромагнитной индукции, на поверхности раздела

$$\frac{\partial E}{\partial z} = i\mu 2\pi f H,$$

где E и H — напряженности соответственно электрического и магнитного поля; f , Гц, — частота тока, i — мнимая единица; z , м, — координата, направленная по нормали к поверхности раздела. Поэтому условие непрерывности электрического и магнитного поля на границе двух сред может быть записано так:

$$\rho_1 j_1 = \rho_2 j_2;$$

$$\frac{\rho_1}{\mu_1} \frac{\partial j_1}{\partial z} = \frac{\rho_2}{\mu_2} \frac{\partial j_2}{\partial z},$$

где ρ_1, ρ_2 , Ом·м, — удельные сопротивления покрытия и подложки соответственно; μ_1, μ_2 — относительные магнитные проницаемости покрытия и подложки; j_1, j_2 , А/м², — плотности тока внутри покрытия и подложки.

В силу этого при $\rho_1 > \rho_2$ на границе раздела сред (покрытие — подложка) плотность тока должна иметь резкое увеличение, что приведет к нагреву узкой зоны [1]. Для покрытий, нанесенных плазменным методом, удельные сопротивления покрытия и подложки могут различаться на 2–3 порядка. В этих случаях данный эффект будет выражен достаточно ярко, а максимальное выделение тепла будет на стыке двух сред.

Для определения удельного электрического сопротивления покрытия, нанесенного методом плазменного напыления, использовалась статистическая формула расчета сопротивления гетерогенной матричной структуры, учитывающая наличие разнородных включений и их концентрацию [2]:

$$\rho_m = \frac{1}{\rho_{1,2} \frac{1}{4} + \sqrt{\frac{\rho_{1,2}^2}{16} + \frac{1}{2\rho_1\rho_2}}},$$



где

$$\rho_{1,2} = \frac{(3C_1 - 1)\rho_2 + (3C_2 - 1)\rho_1}{\rho_1\rho_2},$$

ρ_m , Ом·м, — удельное сопротивление многокомпонентного покрытия; ρ_1, ρ_2 , Ом·м, — удельные сопротивления компонентов покрытия; C_1, C_2 — их концентрации (в относительных единицах).

Для исследования процесса индукционного нагрева были использованы численные методы решения электромагнитной и тепловой задач, основанные, в частности, на методе контрольного объема [2].

Математическая модель процессов, протекающих в нагреваемой заготовке, составляется на основе закона сохранения энергии и уравнений электромагнитного поля. В основе расчета лежит система уравнений Максвелла:

$$\begin{cases} \text{rot } \vec{H} = \vec{J}; \\ \text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \\ \text{div } \vec{B} = 0; \\ \text{div } \vec{D} = \rho_{\text{эл}}, \end{cases}$$

где B , Тл, — магнитная индукция; D , Кл/м² — электрическое смещение; t , с — время.

Записывая закон электромагнитной индукции для случая индукционного нагрева через напряженность электрического поля, получим уравнение электромагнитной задачи

$$\Delta \vec{E} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \mu \frac{\partial}{\partial t} (\vec{J}_{\text{пр}}) + \text{grad } \frac{\rho_{\text{эл}}}{\varepsilon},$$

где ε — электрическая проницаемость, $J_{\text{пр}}$, А/м², — плотность тока, определяемая электропроводностью.

В качестве граничного условия при решении электромагнитной задачи используется значение напряженности электрического поля E_n , определенную по принципу суперпозиции как сумма напряженностей, полученных от тока в витках индуктора и от тока заготовки [2]:

$$\dot{E}_n = -j\omega \frac{\mu_0 I_c}{2\pi} \frac{\sqrt{R_c}}{\sqrt{r_n}} \sum_{m=1}^{w_c} F(k_{nm}) -$$

$$-j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{r_n}} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \sigma_{ij} \dot{E}_{ij} \Delta S_{ij} \sqrt{r_j} F(k_{nij}),$$

где E_n , В/м, — напряженность электрического поля в некоторой точке n ; r_n , м, — радиальная координата точки n , R_c , м, — радиус витков индуктора; σ , 1/Ом·м — удельная проводимость; w_c — число витков индуктора; I_c , А, — ток в витках индуктора; $\Delta S_{ij} = \Delta z_i \Delta r_j$, z и r — осевая и радиальная координаты условного контура с током; $F(k)$ — функция:

$$F(k) = \frac{2-k^2}{k} K(k) - \frac{2}{k} E(k);$$

$K(k)$ и $E(k)$ — интегралы Лежандра:

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1-k^2 \sin^2(\alpha)}} d\alpha,$$

$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1-k^2 \sin^2(\alpha)} d\alpha,$$

$$k = \frac{\sqrt{4R_c r}}{z^2 + (R_c + r)^2},$$

$$k_n = \frac{4r_n r}{(z_n - z)^2 + (r_n + r)^2}.$$

Для расчета тепловой задачи решается уравнение баланса энергии, основанное на законе сохранения энергии:

$$\gamma c_p \frac{\partial T}{\partial t} = p_2 - p_{\text{rad}} - p_{\text{cond}}.$$

где c_p , Дж/К, — теплоемкость материала заготовки; γ , г/м³ — плотность; p_2 , Вт/м³ — удельная мощность, поступающая в нагреваемую заготовку; p_{rad} — удельная мощность, теряемая за счет излучения; p_{cond} — удельная мощность, передаваемая теплопроводностью; T , °К, — температура нагреваемой заготовки.

В уравнении баланса энергии объединены все основополагающие процессы, происходящие в проводящей заготовке (нагрев металла, преобразование электрической энергии в тепловую, все механизмы потерь энергии и ее использования). Решение уравнения баланса энергии позволяет проследить, как внешние параметры

индуктора влияют на технологический процесс нагрева и физические параметры нагреваемой заготовки (скорость нагрева, распределение температуры в нагреваемой заготовке, а также ее плотность, теплоемкость, электропроводность и т. д.). Поскольку большинство индукторов имеют цилиндрическую конструкцию, то уравнение баланса энергии удобно решать в цилиндрической системе координат. Уравнение баланса энергии позволяет определить изменение температуры заготовки T по времени и по двум направлениям координат — z и r :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{j^2}{\sigma} - p_{rad} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right),$$

где λ , Вт/м·К, — теплопроводность нагреваемой заготовки; σ , 1/Ом·м — электропроводность нагреваемой заготовки.

Совокупность этих уравнений с начальными и граничными условиями и с дальнейшим численным их решением позволяет получить как распределения параметров, характеризующих сам индуктор, так и параметры, отражающие процессы внутри нагреваемого проводящего цилиндра.

Модель предполагает следующие допущения: индуктор рассматривается как несколько круговых витков, плоскость которых перпендикулярна оси индуктора; по виткам индуктора протекает синусоидальный ток; в проводящем цилиндре и в индукторе ток переноса равен нулю; токи во всех витках индуктора одинаковые, имеют нулевую фазу. Для решения тепловой задачи используются граничные условия двух типов: граничные условия 1-го рода — условия Дирихле (на границе задаются значения искомой величины) на входе в индуктор и граничные условия 2-го рода — условия Неймана (задается производная от искомой величины по направлению, перпендикулярному к границе, равной нулю) на остальных границах расчетной области. Сделано допущение, что ввиду отсутствия вынужденной конвекции все энергетические процессы активно происходят только внутри металлической заготовки. Так как индуктор и заготовка имеют цилиндрическую форму, то для записи уравнений удобно использовать цилиндрическую систему координат. Предполагается, что изменение величин при изменении угла φ мало, и им можно пренебречь. Поэтому рассматривается двухмерный

случай, в котором подразумевается двухмерная (r, z) зависимость искомых величин.

Система нелинейных дифференциальных уравнений решается методом контрольного объема [2]. Исходными данными для расчета служат геометрические параметры индуктора и заготовки, ток индуктора, частота тока индуктора, свойства материала заготовки, скорость движения заготовки через нагреватель.

Расчет был произведен для конкретных исходных данных, определяемых параметрами образцов и установок, на которых производились впоследствии экспериментальные исследования: начальная температура заготовки — 20 °С, материал — нержавеющая сталь 08X18H10T, диаметр заготовки — 30 мм. Покрытие: материал — ПГСП2 (Ni—Gr—B—Si), толщина — 100 мкм, удельное сопротивление — $1,078 \cdot 10^{-5}$ Ом·м. Параметры установки: мощность — 60 кВт, частота — 66 кГц.

Результатами расчета являются распределения различных величин температуры, электрического и магнитного полей, плотности электрического тока в расчетной области в процессе нагрева.

На рис. 1 представлено радиальное распределение плотности наведенного тока в нагреваемой заготовке. Из графика распределения плотности электрического тока (кривая 1) видно, что ее максимальное значение $j = 4200$ А/см² достигается на границе подложки и покрытия, а не на поверхности заготовки, как в случае нагрева однородной заготовки без покрытия (кривая 2). Внутри покрытия ток практически отсутствует. Соответственно, максимальная удельная мощность

$p = \frac{j^2}{\sigma}$, Вт/м³, будет выделяться в зоне на границе материалов. Вследствие этого максимальная температура также будет в области на поверхности подложки (рис. 2).

На рис. 2 представлено распределение температуры в заготовке. Как видно из него, в зоне сцепления покрытия и подложки температура достигает 1150 °С, спадает до 500 °С на расстоянии 0,05 мм от границы слоя внутри покрытия и 0,3 мм внутри подложки, а на поверхности покрытия и на глубине 0,5 мм от поверхности подложки не превышает 200 °С. Таким образом, нагреву свыше 500 °С подвергается зона в области сцепления покрытия и подложки шириной не более 0,35 мм в радиальном направлении.

Выбор режима (скорость перемещения заготовки, ток и напряжение на индукторе) индукционного нагрева покрытий из различных материалов определяется размерами заготовки (диаметр, толщина покрытия), свойствами материала, мощностью и частотой тока источника питания. Выбор частоты осуществляется из учета свойств материала заготовки (глубины проникновения тока). Для заготовки Ш30 мм из стали 08Х18Н10Т с покрытием толщиной 100 мкм оптимальным будет следующий режим обработки: частота — 66 кГц, время нагрева — 10 мс, внутренний диаметр индуктора по меди — 42 мм, температура нагрева зоны сцепления «покрытие — подложка» — 1154 °С (температура плавления стали 08Х18Н10Т — 1400 °С, покрытия ПГСП2 — 1500 °С), при этом температура в центре заготовки — 35 °С, ширина зоны, нагретой более 700 °С, — 1,7 мм.

С использованием индукционного нагрева получены покрытия, отличающиеся улучшенными свойствами. Результаты исследований свидетельствуют о существенном влиянии индукционной термообработки на их прочностные характеристики. На рис. 3 приведен пример структуры покрытий заготовок после ускоренной индукционной обработки. Видно: покрытие является плотным, содержание пор — низкое; практически отсутствуют поры на границе покрытия и основы; граница раздела покрытия и основы имеет высокий уровень адгезии.

Результаты металлографических исследований шлифов покрытий толщиной 100–200 мкм на стальной основе показали:

1) для структур покрытий из материалов Ni, FeCr, Cr₂B, CrB, Cr₇C₃, Cr₂O₃ получены твердость

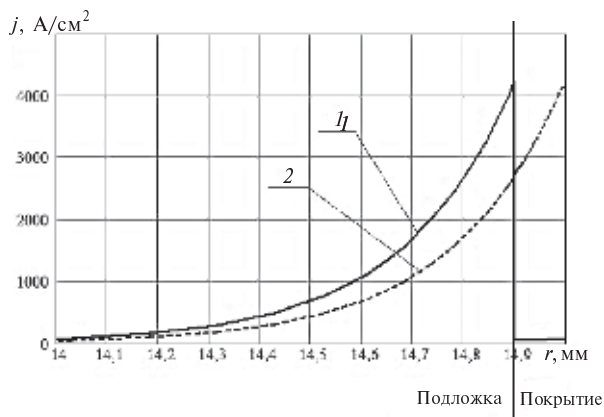


Рис. 1. Радиальное распределение плотности тока в заготовке

HRC 60–65, объемная плотность 6,5–7 г/см³, открытая пористость 6–7 % (рис. 3), микротвердость 8100–8290 МПа, содержание кислорода 0,1–0,2 %, частично распадаются бориды и карбиды;

2) для структуры Cu₃Al₄ характерны плотность 6,4 г/см³, пористость 5–6 %, микротвердость 1100–2500 МПа, содержание кислорода 0,02–0,1 %; для WC, Co твердость 60–64 HRC, плотность 13,5–15,5 г/см³, пористость 2,5–3 %, микротвердость 7697–12146 МПа, содержание кислорода 0,08–0,15 %, частичное разложение WC на W и W₂C, Co растворяется в WC с образованием Co₃W₃C; для Ni₃Al твердость 30–35 HRC, плотность 6,45–6,85 г/см³, пористость 8–10 %, микротвердость 3430–6810 МПа, содержание кислорода 0,2–0,25 %, появляются фазы NiAl₃₂O₄₉ и NiAl₃₆O₄₆.

На основании проведенных исследований технологии плазменного напыления полученных

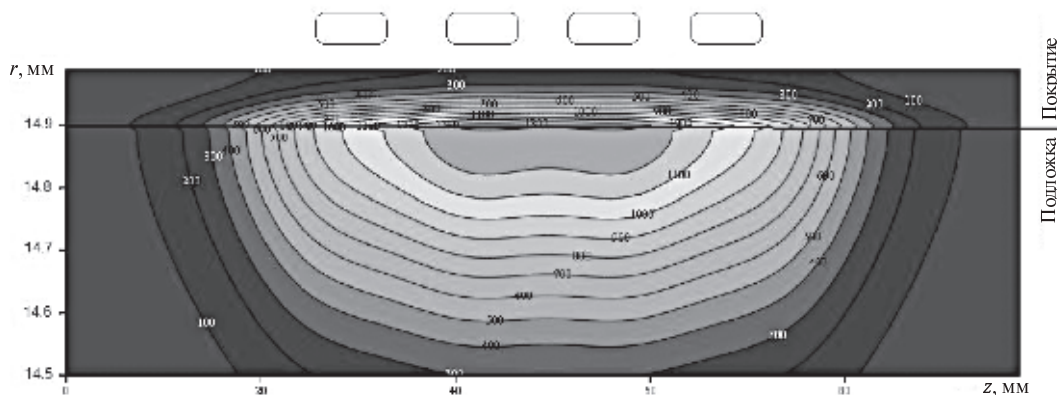


Рис. 2. Распределение температуры в заготовке

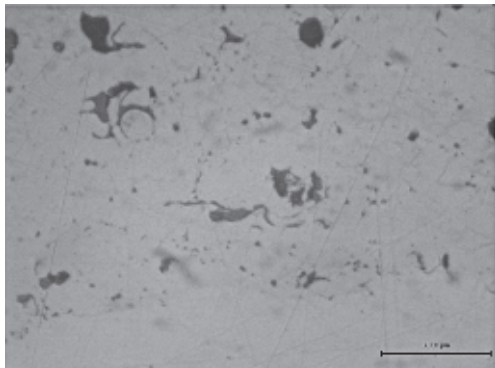


Рис. 3. Поперечный шлиф образца после индукционной термообработки при мощности колебательного контура в 36,8 кВт (масштаб 1:1000)

общих и специальных характеристик напыленных покрытий в настоящее время разработаны и внедрены технологии создания защитных покрытий различного класса на новых изготавливаемых деталях и восстановления изношенных изделий.

Выводы

Использование ускоренного индукционного нагрева позволяет производить оплавление зоны сцепления между покрытием и подложкой

без нагрева заготовки в целом (при достижении температуры плавления материала на границе покрытия и подложки ширина зоны, нагретой более 700 °С, составляет 1,7 мм, остальная часть заготовки термическому воздействию не подвергается), а также производить обработку с высокой скоростью и высоким качеством нагрева.

Разработана программа для моделирования и расчета методом контрольного объема температурного поля заготовки, а также электрофизических параметров процесса индукционного нагрева слоистых сред на основе численных методов.

Разработан метод ускоренного индукционного оплавления самофлюсующихся покрытий, нанесенных плазменным напылением, значительно повышающий ресурс работы детали: возрастает твердость нанесенного покрытия за счет снижения пористости покрытия, увеличивается адгезия между покрытием и подложкой. Пористость покрытий после индукционной обработки сокращается с 12–14 до 6–9 %, твердость удаётся повысить с 42 до 60–65 (HRC) для покрытия ПГСП2 и с 25 до 30–35 (HRC) для покрытия ПТЮ-10Н, что значительно увеличивает их износостойкость, препятствует образованию сколов, отслоению и разрушению покрытия в процессе эксплуатации детали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фролов, В.Я.** Повышение эксплуатационных свойств плазменных покрытий методом индукционной термообработки [Текст] / В.Я. Фролов, Е.А. Смирнова, Б.А. Юшин // Металлообработка: научно-производственный журнал.— СПб.— 2009. № 2(50).— С. 28–33: ил.
2. **Фролов, В.Я.** Анализ процессов на стадии контакта в условиях обработки металлов электро-контактно-дуговым методом [Текст] / В.Я. Фро-

лов // Металлообработка: научно-производственный журнал.— СПб.— 2002. № 5.— С. 16–23.

3. **Дресвин, С.В.** Основы математического моделирования плазмотронов [Текст]: учеб. пособие / С.В. Дресвин, Д.В. Иванов; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004–2006.— Ч. 2: Электромагнитные задачи в плазмотронной технике.— 2006.— 295 с.: ил.

УДК.621.735.79

М.М. Радкевич, А.И. Новиков, Д.Ю. Фомин

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ПРОГРАММНОЙ МЕХАНИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Современные требования в части производства высококачественной продукции машиностроения, надежной, с повышенным рабочим ре-

сурсом, определяют необходимость совершенствования технологий обработки металлов и сплавов, повышающих механические и эксплуатаци-



онные свойства изделий. Поэтому важное значение приобретает технология программной механико-термической обработки (ПТМО), позволяющая повышать механические, а также другие свойства металлов и к тому же являющаяся непрерывной, металло- и энергосберегающей.

Исходя из основной задачи программной механико-термической обработки следует допустить прохождение лишь начальной стадии рекристаллизации горячедеформированного аустенита и при этом обеспечить равномерное распределение дислокаций. Стадия возврата, при которой в пределах каждого кристалла образуются новые малоугловые границы [1], называется полигонизацией. Она имеет много общего с начальной стадией первичной рекристаллизации — формированием центров рекристаллизации [2]. Оба процесса связаны с перераспределением дислокаций, ведущим к формированию новых границ, но эти два процесса нельзя отождествлять. Когда становится возможным перераспределение дислокаций, как правило, сразу же начинается формирование центров рекристаллизации.

Анализ имеющихся сведений о механизме полигонизации приводит к выводам о факторах, которые могут влиять на скорость процесса. Прежде всего, таким фактором является характер дислокационной структуры, образующейся при деформации. Чем более неоднородно распределение дислокаций, тем труднее последующее их перераспределение с образованием малоугловых границ, т. е. тем труднее протекает полигонизация.

Для первичной рекристаллизации не существует критической температуры в том смысле, в каком она существует для фазового превращения. Из всех процессов, происходящих в твердом состоянии, к рекристаллизации наиболее близки аллотропические превращения. Они также совершаются через образование зародышей и их последующий рост.

При рекристаллизации плотность дислокаций, точечных дефектов и создаваемые ими искажения решетки максимальны в исходном, горячедеформированном состоянии и убывают по мере протекания процесса. Зародышами при первичной рекристаллизации могут быть либо выросшие на последней стадии полигонизации крупные субзерна, которые уже окаймлены границами с большим углом разориентировки от других субзерен, либо участки исходных боль-

шеугловых границ сильнодеформированных зерен. [3]

Представление о том, что формирование центров рекристаллизации связано с перераспределением дислокаций, подкрепляется также косвенными результатами, полученными при изучении начальных стадий рекристаллизации в чистых металлах [4]. В них отчетливо проявилась роль характера дислокационной структуры.

При нагреве после деформации с малыми степенями обжатия идет термически активируемый процесс перераспределения наиболее подвижной части дислокаций. Это вызывает небольшое нарушение упругого равновесия дислокационных скоплений. Однако абсолютная плотность дислокаций и величина упругих напряжений невелики, а потому не происходит массового перераспределения дислокаций и формирования зародышей рекристаллизации. Это может начаться только при значительно более высоких температурах, когда развиваются термически активируемые процессы и резко снижается сопротивление сдвигу.

В случае деформации с большими степенями обжатия, когда плотность дислокаций велика, достаточно небольшого диффузионного нарушения упругого равновесия дислокационных скоплений, чтобы начался интенсивный процесс их перераспределения.

Этот процесс приводит к формированию границ зародышей рекристаллизации, которые либо сразу имеют большие углы разориентировки, либо превращаются в высокоугловые в течение определенного времени. Такое перераспределение идет со скоростью, значительно превышающей скорость диффузии вакансий и дислоцированных атомов, и поэтому опережает полигонизацию, которая лимитируется скоростью переползания дислокаций.

Таким образом, начальная стадия рекристаллизации связана с коллективными атомными перемещениями. Диффузия одиночных атомов (вакансий) играет вспомогательную роль и создает необходимые условия для перераспределения дислокаций.

Общее для полигонизации и начальной стадии рекристаллизации то, что оба процесса совершаются за счет перераспределения дислокаций, однако характер перераспределения в этих двух случаях совершенно разный.

Существенный момент — разная зависимость скорости этих двух процессов от степени

деформации. С увеличением степени деформации облегчается рекристаллизация. При деформации с малыми степенями деформации полигонизация успевает совершиться до рекристаллизации, тогда как после сильной деформации рекристаллизация всегда начинается раньше, а полигонизация практически вообще не реализуется.

Увеличение числа дефектов, особенно вакансий, облегчает миграцию атомов в твердом теле и ведет к проявлению и ускорению диффузии. Они оказывают влияние на изменение физических свойств, в частности на механизм и кинетику диффузионных процессов. Вакансии также имеют важное значение в процессе растворения, выделения и коагуляции первичных и вторичных фаз. Особенно это относится к высоким температурам, когда указанные процессы вследствие увеличения дефектов значительно интенсифицируются.

При охлаждении (закалка) после горячей пластической деформации возникает неравномерная концентрация дефектов, превышающая термодинамически равновесную. В таком случае появляется термодинамическая движущая сила, которая стремится уменьшить концентрацию дефектов до равновесной величины, соответствующей данной температуре. Весьма пристального внимания требуют вопросы равномерности распада твердого раствора. Неравномерность распада отрицательно сказывается на деформационной способности конструктивных материалов. Усиление однородности распада (увеличение числа центров кристаллизации) может обеспечить более изотропное состояние твердого раствора и способно перераспределять пики напряжений, благодаря этому предотвращая преждевременное разрушение.

Итак, образование зародышей рекристаллизации не связано с возникновением совершенно новых поверхностей раздела, а происходит лишь за счет перераспределения дислокаций, уже имеющих в деформируемом материале.

Инкубационный период формирования зародышей рекристаллизации связан со временем, необходимым для протекания диффузионных и вообще термически активируемых процессов, нарушающих упругое равновесие дислокаций и создающих возможность их перераспределения.

Основная причина роста новых рекристаллизованных зародышей — стремление к умень-

шению зернограницной («поверхностной») энергии благодаря уменьшению протяженности границ при росте зерна. [5]. Анизотропия скорости роста зародыша обусловлена, очевидно, прежде всего неравномерным распределением энергии из-за различия плотности дефектов вдоль границы и в разных направлениях внутри самого зерна.

Пластическая деформация при температуре выше температуры рекристаллизации, но при условии немедленного охлаждения, исключающего рекристаллизацию, обеспечивает лучшее сочетание механических свойств, чем закалка без деформации.

Существенно, что если за время между окончанием деформации и охлаждением успевают завершиться начальные стадии рекристаллизации, то эффект упрочнения заметно не уменьшается.

Так, учитывая многофакторность процесса рекристаллизации, а также то, что пластическая деформация неоднородна по своей природе, необходимо было изучить влияние последеформационных пауз на процесс рекристаллизации стали 08X18H10T в условиях ПМТО.

Проведенные нами металлографические исследования изделий, полученных из стали 08X18H10T при различных последеформационных выдержках и разных температурах деформирования, позволили построить диаграмму, отображающую зависимость среднего размера зерна от названных параметров (рис. 1).

Анализ полученной диаграммы показывает, что при значениях последеформационной паузы от 10 до 40 секунд не наблюдается значительного изменения среднего размера зерна. Только лишь при температуре деформирования 1100 °С и последеформационных паузах 40 с зерно начинает заметно увеличиваться. На рис. 2 показана микроструктура изделий из стали 08X18H10T, полученных в результате ПМТО с различными последеформационными паузами.

Изучая влияние начальных стадий рекристаллизации после горячей пластической деформации, необходимо иметь в виду отличительные особенности структурных изменений при этом. Благодаря тому, что при горячей пластической деформации облегчены переползание и поперечное скольжение дислокаций и, как следствие, их перераспределение и частичная аннигиляция, уже непосредственно в ходе этой деформации



протекают процессы полигонизационного типа. Отличительной особенностью полигонизации при горячей деформации является то, что дислокации образуют менее правильные границы субзерен.

Структура такого типа должна быть намного стабильнее, чем та, которая образуется непосредственно после холодной деформации. Несколько иначе совершается в ней и рекристаллизация.

По-видимому, при рекристаллизации, следующей непосредственно за горячей деформацией, наиболее вероятен механизм формирования центров рекристаллизации за счет коалесценции субзерен, образовавшихся в процессе деформации. Стадия формирования центров рекристаллизации не вызывает существенного ухудшения свойств, созданных при деформационно-термической обработке.

Таким образом, режимы горячей пластической деформации и нагрева при ПМТО должны быть такими, чтобы не успела заметно начаться стадия роста центров рекристаллизации. Между тем стадия формирования этих центров не опасна с точки зрения эффекта упрочнения.

Рекристаллизацию и укрупнение зерна замедляют элементы, тормозящие диффузию, более крупное исходное зерно, меньший уровень

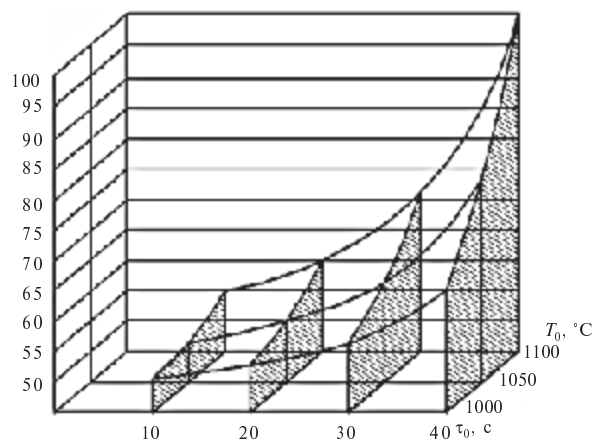


Рис. 1. Зависимость среднего размера зерна от температуры деформации и времени подстуживания

деформирующего напряжения, меньшая скорость деформаций, меньший наклеп металла, предварительное протекание полигонизации с созданием совершенной полигонизованной структуры, у которой понижена плотность дислокаций.

Частицы вторичной фазы могут увеличивать сопротивление деформации и наклеп, облегчать протекание рекристаллизации, но могут и замед-

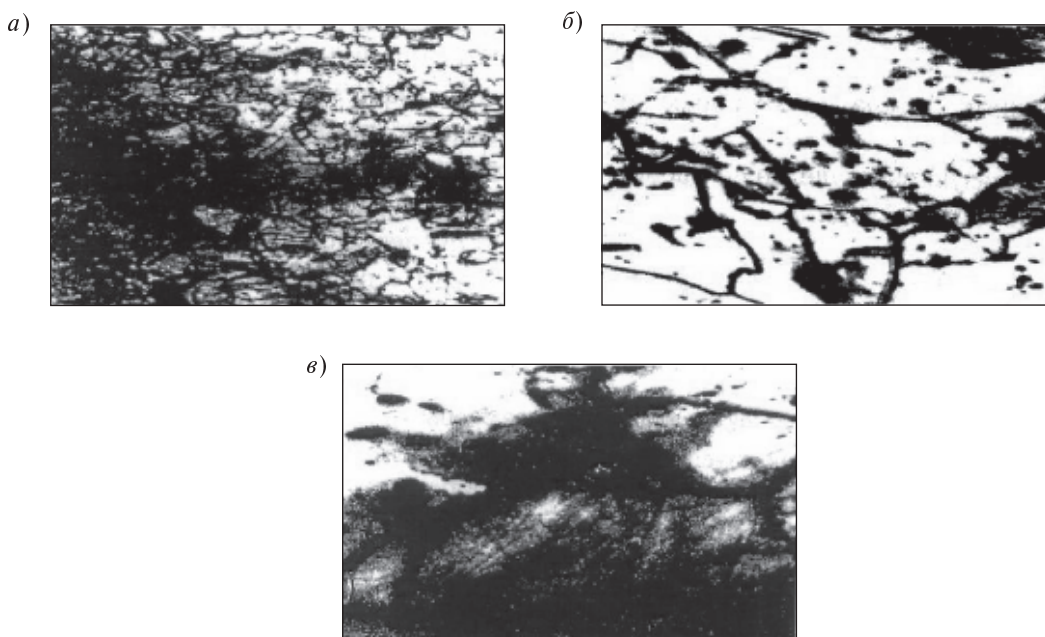


Рис. 2. Зеренная структура стали 08X18H10T после ПМТО (г340):
а — $\tau_{\text{п}} = 20$ с; б — $\tau_{\text{п}} = 30$ с; в — $\tau_{\text{п}} = 40$ с

лить ее в результате торможения миграции большеугловых границ.

Рассмотренный дислокационный механизм формирования центров рекристаллизации позво-

ляет объяснить возможность и условия получения в результате ПМТО, во-первых, однородной субструктуры, во-вторых, более однородной и равноосной микроструктуры сталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арзамасов, Б.Н. Материаловедение: учебник для высших технических учебных заведений [Текст] / Б.Н. Арзамасов, И.И. Сидорин, Г.Ф. Косолапов [и др.]; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. — 2-ое изд., исп. и доп. — М.: Машиностроение, 1986. — 384 с.
2. Горелик, С.С. и др. Рекристаллизация металлов и сплавов [Текст] / С.С. Горелик. — М.: Металлургия, 1978. — 568 с.
3. Циммерман, Р. Металлургия и металловедение [Текст]: справ. издание / Р. Циммерман, К. Пютнер; Пер. с немецкого. — М.: Металлургия, 1982. — 480 с.
4. Бурке, Дж.Е. Успехи физики металлов [Текст] / Дж.Е. Бурке, Д. Тарнбалл. — М.: Металлургиздат, 1956. — Т. 1. 368 с.
5. Лахтин, Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов [Текст] / Ю.М. Лахтин. — М.: Металлургия, 1983. — 359 с.

УДК 608.1

С.А. Иваньков, А.Я. Башкарев

О ДОЛГОВЕЧНОСТИ И ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИТОВ

Большинство композиционных материалов относится к соединениям материалов, значительно отличающихся по своей природе, физико-механическим свойствам, молекулярному и надмолекулярному строению. В качестве примеров таких материалов можно назвать стеклопластики, металлополимерные композиты, цементобетоны, асфальтобетоны и т. п. Соединение между ними обеспечивается благодаря связующему фрагменту композиционного материала, которым во многих случаях может быть один из элементов композита, например полимер в углепластике. Как правило, он взаимодействует с составляющими композита в основном с помощью вандерваальсовых сил, которые значительно уступают по своей энергии химическим связям, но их бывает достаточно, чтобы перераспределить нагрузку между более прочными элементами композита, и это обеспечивает изготовленной из него конструкции высокую прочность.

Однако долговечность композита полностью зависит от долговечности адгезионных связей, которые находятся под воздействием температуры эксплуатации изделия и некоторого напряженного состояния, существенно отлича-

ющегося от расчетных значений для материала в целом.

Многочисленные исследования показывают, что долговечность физических, как и химических, связей достаточно хорошо описывается термофлуктуационной теорией прочности, каноническая формула которой записывается так:

$$t_* = \tau_0 \exp \frac{u - \gamma \sigma}{RT}, \quad (1)$$

где t_* — долговечность соединения; τ_0 — предэкспоненциальный коэффициент, $10^{-11} - 10^{-13}$ с; u — энергия активации процесса разрушения адгезионных связей; σ — нормальные растягивающие напряжения; γ — коэффициент чувствительности соединения к действию механической нагрузки; R — универсальная газовая постоянная.

При переменных напряжениях и температурах эта же зависимость приобретает вид, который называют критерием Бейли:

$$\int_0^{t_*} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u - \gamma \sigma(t)}{RT(t)}} = 1. \quad (2)$$



Связи между составляющими композиционного материала принято называть адгезионными. Их образование обеспечивается появлением или существованием в связующем (полимер, битум, цементное молоко и т. п.) активных радикалов — активных фрагментов его молекул. Очень часто они образуются непосредственно в процессе формирования композита под воздействием температуры, механических деформаций или специально добавляемых реагентов, которым может быть и кислород воздуха. Как правило, технологический процесс происходит при тепловых режимах более экстремальных, чем условия эксплуатации.

Чем большее количество адгезионных связей на единицу площади граничной поверхности образовывается к концу процесса изготовления композита, тем выше прочность соединения. Появление газовых включений в композиции, наличие зон с отсутствием контакта между связующим и другими ее компонентами неизбежно отрицательно сказываются на прочности. Но это — отдельный вопрос технологии, и здесь он пока не затрагивается.

Период жизни образовавшейся в какой-то момент технологического процесса адгезионной связи включает два временных цикла. Первый — относительно короткий, но протекающий в условиях экстремальных, характерных для режимов технологического процесса. Второй — это длительное время эксплуатации.

При изучении влияния технологических режимов на прочность адгезионных соединений основное внимание обращалось на ее зависимость от температуры. Фактору времени теплового воздействия большого значения не придавалось, хотя его влияние может существенно сказываться не только на прочности, но и на долговечности композита.

Рассмотрим случай, когда активные радикалы в связующем образуются в результате термодеструкции его молекул. Например, это имеет место при использовании битумов, термопластов и т. д. Пусть u_n — энергия активации разрушения молекулы адгезива. За элементарный отрезок времени к моменту $t = \psi$ появится определенное количество активных радикалов. Предположим, что с коэффициентом K , который меньше единицы и зависит от целого ряда технологических факторов, эти радикалы образуют в момент ψ следующее число адгезионных

связей, обладающих своей энергией активации разрушения u_a :

$$dN_1 = \frac{Kdt}{\tau_0 \exp \frac{u_n}{RT(t)}}.$$

Из этого числа адгезионных связей к моменту t_* в процессе термодеструкции частично разрушатся

$$dN_2 = dN_1 \int_{t=\psi}^{t_*} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u_a}{RT(t)}}.$$

Тогда количество сохранившихся связей к тому же моменту времени определится как разность

$$dN_3 = dN_1 - dN_2 = dN_1 \left(1 - \int_{t=\psi}^{t_*} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u_a}{RT(t)}} \right).$$

Чем позднее образовалась адгезионная связь, тем больше проходит времени с начала технологического процесса до ее разрушения. Общее же количество сохранившихся связей к моменту t_* из числа всех образовавшихся будет определяться выражением

$$N_3 = K \int_0^{t_*} \frac{1 - \int_{t=\psi}^{t_*} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u_a}{RT(t)}}}{\tau_0 \exp \frac{u_n}{RT(t)}} d\psi.$$

При постоянной технологической температуре количество сохранившихся связей равно

$$N_3 = K \frac{t_*}{\tau_0 \exp \frac{u_n}{RT}} \left(1 - \frac{t_*}{2\tau_0 \exp \frac{u_a}{RT}} \right). \quad (3)$$

Таким образом, максимальная адгезионная прочность будет достигаться в момент

$$t_{*o} = \tau_0 \exp \frac{u_a}{RT}.$$

Очевидно, если провести эксперимент по испытанию адгезионной прочности соединений,

полученных при какой-то определенной температуре, то по значению оптимального времени можно рассчитать энергию активации разрушения адгезионных связей

$$u_a = RT(27,6 + \ln t_{*o}). \quad (4)$$

Здесь принято $\tau_0 = 10^{-12}$ с.

Такая методика определения энергии активации разрушения адгезионных связей для многих материалов имеет существенное преимущество перед известными ранее. Все они основываются на испытании образцов на долговечность при разных температурах.

Полученные результаты и данные о режимах экспериментов t_* , σ и T подставляются в формулу (1) или (2), после чего решается система уравнений, из которой определяются сразу два основных параметра долговечности — u и γ . Однако известно, что коэффициент γ , отражающий влияние механических напряжений на долговечность адгезивов, в большинстве случаев зависит от температуры, поэтому полученные результаты нельзя считать корректными для композиционных материалов.

Энергия активации процесса разрушения u от напряжений не зависит. А потому, зная ее величину и проведя испытания на долговечность при конкретной температуре, например характерной для эксплуатации узла, можно установить и коэффициент γ , что в дальнейшем даст возможность проводить расчеты на долговечность деталей, изготовленных из композиционного материала.

В нашей работе был выполнен подобный эксперимент применительно к полиамидным антифрикционным покрытиям, наносимым на металлическую подложку.

Общий вид использованных образцов и схема их нагружения представлены на рис. 1.

Для нанесения покрытия использовался мелкодисперсный порошок полиамида П-66. Детали 1 и 2 в сборе предварительно устанавливались в специальную оправку, обеспечивающую конструкции достаточную металлоемкость для аккумулирования при нагреве тепла, необходимого для оплавления полимера. В собранном виде конструкция помещалась в термостат, где нагревалась до заданной температуры. Затем на поверхность образца отсыпался полиамидный порошок, где он расплавлялся. С помощью спе-

циального дозирующего устройства достигалась одинаковая для всех образцов толщина полимерного слоя. После отсыпки полиамида образцы помещались снова в термостат и выдерживались в нем некоторое установленное условиями эксперимента время. Затем они снова извлекались и охлаждались погружением в масло при нормальной комнатной температуре. Быстрое охлаждение позволяло конкретизировать температурно-временное технологическое воздействие. Проведенные ранее исследования показали, что отрицательного воздействия на адгезию полиамида погружение в масло не оказывает.

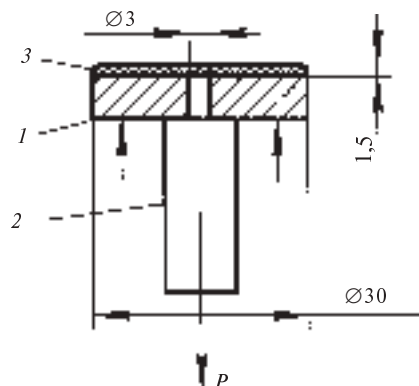


Рис. 1. Схема нагружения образца антифрикционного покрытия на металлической подложке:
1 — стальная шайба с отверстием по центру;
2 — стальной штифт, устанавливаемый в отверстие шайбы по скользящей посадке;
3 — полиамидное покрытие

Через сутки после подготовки образцы испытывались на адгезионную прочность с извлечением штифта из шайбы. Нагружение образцов проводилось на испытательной машине ИР-5040-5 со скоростью 165 МПа/с.

На рис. 2 приведен график зависимости прочности образцов от времени технологической выдержки в термостате. Из него видно, что для полиамида П-66 оптимальное время при температуре 280 °С равно 420 с. Использование этого значения в выражении (4) дало возможность рассчитывать величину u_a для адгезионного соединения полиамида П-66 и стали Ст 3, она оказалась равной 154 673 Дж/моль.

Для определения коэффициента γ для адгезионного соединения приходится применять дру-

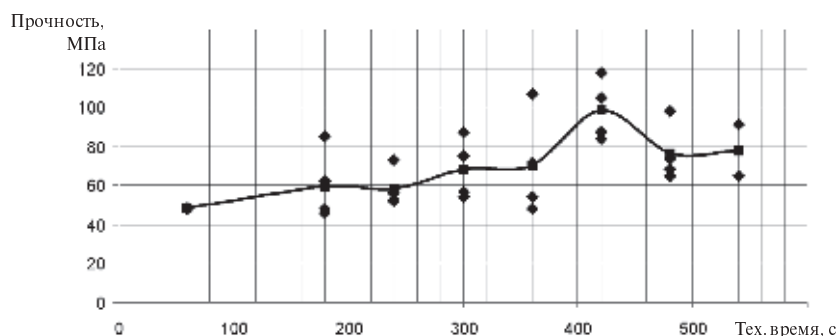


Рис. 2. Зависимость адгезионной прочности соединения «полиамид—сталь» от времени выдержки при температуре 280 °С

гую, более сложную методику. Она основывается на предположении, что процесс разрушения адгезионных связей под нагрузкой происходит в два этапа. Во время первого в соединении количество адгезионных связей постепенно уменьшается до определенного критического значения. Затем наступает второй, фактически мгновенный этап, когда выравниваются по величине действующие напряжения и остаточная прочность адгезии.

Для этого случая критерий Бейли имеет вид

$$\int_0^{t_*} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u - \gamma \sigma(t)}{RT(t)}} = 1 - \frac{\sigma_*}{\sigma_0}. \quad (5)$$

Здесь t_* — момент завершения первого этапа (фактически это долговечность адгезионного соединения); σ_0 — адгезионная прочность перед нагружением; σ_* — действующие напряжения в момент t_* .

Если напряжения и температура постоянные, т. е. не зависят от времени, то последнее выражение примет вид

$$t_* = \tau_0 \left(1 - \frac{\sigma_*}{\sigma_0} \right) \exp \frac{u - \gamma \sigma_*}{RT}.$$

Откуда следует

$$\gamma = \frac{RT \left(\ln t_* - \ln \tau_0 - \ln \frac{\sigma_0 - \sigma_*}{\sigma_0} \right) - u}{\sigma_*}.$$

Здесь предполагается, что значение u определено заранее по описанной методике.

Для ускорения процесса испытания целесообразно вести непрерывное увеличение действующей нагрузки, т. е. рабочих напряжений, например по линейному закону. Тогда выражение (5) для постоянной температуры примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \int_0^{t_*} \exp \frac{\gamma \dot{\sigma} t \left[1 + \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_*} - 1 \right) \frac{t}{t_*} \right]}{RT} dt = \\ = \tau_0 \left(1 - \frac{\sigma_*}{\sigma_0} \right) \exp \frac{u}{RT}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $\dot{\sigma}$ — скорость изменения напряженного состояния (по линейному закону).

Решение уравнения (6) требует использования компьютера, но значительно ускоряет проведение эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башкарев, А.Я. Исследование оптимальных технологических режимов восстановления деталей с помощью термопластов [Текст] / А.Я. Башкарев, Ю.Е. Андреев, А.А. Лебедев [и др.] // Повышение эффективности использования машин в строительстве: межвуз. темат. сб. тр. — Л.: Изд-во

ЛИСИ, 1984. — С. 30–38.

2. Петров, В.А. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов [Текст] / В.А. Петров, А.Я. Башкарев, В.И. Веттегренъ. — СПб.: Политехника, 1993. — 475 с.

УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛАСТИН С РЕБРАМИ

Один из основных критериев работоспособности тонкостенных металлических конструкций — условие местной устойчивости. По мере ужесточения требований к металлоемкости машин и внедрения высокопрочных свариваемых сталей возрастает актуальность проблемы прогнозирования и обеспечения устойчивости тонкостенных элементов конструкций на стадии проектирования. Наиболее эффективный способ обеспечения устойчивости пластин — подкрепление их ребрами. Однако именно этот вариант конструктивного решения хуже других поддается теоретическому анализу.

Основы расчетов местной устойчивости были созданы в конце XIX века, и в настоящее время этот критерий присутствует во всех нормативных и справочных материалах по проектированию тонкостенных конструкций. Однако существующие инженерные решения в основном ориентированы на строительные конструкции [1] и не решают всех проблем, встречающихся при проектировании несущих конструкций машин. В частности, рассматриваются только простейшие условия нагружения, нет инженерных рекомендаций по анализу устойчивости пластины с ребрами, оптимальному размещению и выбору параметров ребер. С помощью МКЭ можно рассчитать конструкцию сколь угодно сложной конфигурации при любых условиях нагружения, но эти решения имеют частное значение, трудоемки и не дают возможности конструктору на ранней стадии выбирать рациональные пути обеспечения устойчивости элементов конструкции и анализировать влияние различных факторов. Наша работа посвящена поиску аналитических инженерных методов прогнозирования устойчивости пластин с ребрами в условиях продольного нагружения. Для подбора коэффициентов и проверки предложенных методик использованы результаты многочисленных расчетов различных моделей на устойчивость с помощью МКЭ.

Характерным элементом тонкостенных металлических конструкций является прямоуголь-

ная пластина, закрепленная по контуру и нагруженная продольными напряжениями, линейно распределенными по ее ширине (рис. 1):

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

Здесь σ_{\max} — наибольшее сжимающее напряжение на кромке $y = 0$ (сжимающие напряжения считаются положительными); $\gamma = 1 - \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ — параметр нагружения; σ_{\min} — напряжение на кромке $y = d$. Здесь и далее отсчет координаты y производится от более сжатой кромки.

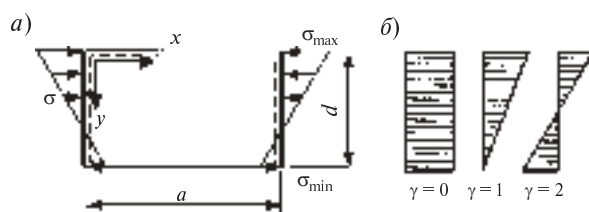


Рис. 1. Расчетная модель шарнирно опертой пластины

Условие устойчивости такой пластины при расчете по допускаемым напряжениям имеет вид

$\sigma_{\max} \leq \frac{\sigma_{\text{кр}}}{n} = [\sigma_{\text{кр}}]$, где $\sigma_{\text{кр}}$ — критическое напряжение пластины; n — коэффициент запаса устойчивости.

Критическое напряжение при $0 \leq \gamma \leq 2$ и $a/d > 0,7$ можно найти по методике [2] как

$$\sigma_{\text{кр}}(\gamma, d) = k_s \zeta_s K_{S0} \left(\frac{t}{d} \right)^2 \leq \sigma_T, \text{ МПа}, \quad (2)$$

где $k_s = (1 + 0,42\gamma + 0,52\gamma^3)$; $K_{S0} = \frac{\pi^2 E}{3(1 - \mu^2)}$; E

и μ — модуль упругости и коэффициент Пуассона для стали, $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,3$; ζ_s — коэффициент, учитывающий жесткость защемления продольных кромок пластины в соседних элементах конструкции (при шарнирном опирании $\zeta_s = 1,0$; при жестком защемлении — $\zeta_s = 1,6$).



Если условие устойчивости не выполняется, то необходимо увеличивать толщину пластины или укреплять ее продольными ребрами жесткости. Второй путь технологически сложнее, но в меньшей степени повышает металлоемкость конструкции. Устойчивость пластины с ребрами (рис. 2, *а* и *б*) будет обеспечена в том случае, если выполнены следующие условия:

а) условие устойчивости ребра вместе с пластиной (система «пластина + ребро»)

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma_{\text{ср}r}]; \quad (3)$$

б) условия устойчивости каждой панели, на которые делит пластину ребро (рис. 2)

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma_{\text{с}i}]. \quad (4)$$

Здесь $\sigma_{\text{ср}r}$ — критическое напряжение для системы «пластина + ребро»; $\sigma_{\text{с}i}$ — критическое напряжение, равное максимальному сжимающему напряжению на кромке $y = 0$, найденному из условия устойчивости i -й панели пластины (рис. 2, *а* — панели 1 и 2; рис. 2, *б* — панели 1, 2 и 3).

Общую структуру выражения для вычисления критического напряжения при совместной потере устойчивости пластины вместе с ребром получим, рассмотрев случай равномерно сжатой пластины с ребром, расположенным посередине. Эту конструкцию можно представить в виде простой модели, состоящей из двух связанных сжатых стержней, одним из которых является пластина, другим — ребро. Критическая сила для такой системы из классического решения получается равной

$$F_c = \pi^2 \frac{E(J_1 + J_2)}{L^2} = F_{c1} + F_{c2}.$$

Таким образом, критическая сила системы «пластина + ребро» равна сумме критических

нагрузок пластины $F_{\text{ср}}$ и ребра $F_{\text{с}r}$, т. е. $F_{\text{ср}r} = F_{\text{ср}} + F_{\text{с}r}$. Перепишем это выражение как

$\sigma_{\text{ср}r}(A_p + A_r) = \sigma_{\text{ср}}A_p + F_{\text{с}r}$, где A_p и A_r — площади сечений пластины и ребра, причем в реальных ситуациях $A_r \ll A_p$ (иначе установка ребра была бы не рациональна). Следовательно, критическое напряжение для системы «пластина + ребро» ($\sigma_{\text{ср}r}$) можно искать в форме суммы $\sigma_{\text{ср}r} = \sigma_{\text{ср}} + F_{\text{с}r}/A_p$, в которой $\sigma_{\text{ср}}$ вычисляется по (2) с учетом условий закрепления пластины, а для определения $F_{\text{с}r}$ ребро рассматривается как сжатый стержень. Чтобы адаптировать это выражение для описания более общих случаев в устойчивости пластины с ребром, следует также учесть форму потери устойчивости системы, характер распределения напряжений (1) и расположение ребра на пластине (рис. 2, *а*). В результате получится выражение вида

$$\sigma_{\text{ср}r} = \sigma_{\text{ср}} + \frac{\pi^2 E J_r k_\beta}{(\mu_L a)^2 d_c t}.$$

Здесь J_r — момент инерции ребра; d_c и t — эквивалентная ширина, которая зависит от распределения (1) напряжений по сечению пластины, и толщины пластины; k_β — коэффициент влияния ребра; $\mu_L a$ — расчетная длина ребра, зависящая от формы потери устойчивости системы.

Коэффициент влияния ребра k_β учитывает степень участия ребра в обеспечении устойчивости системы. Наиболее эффективно расположение продольного ребра на таком уровне по высоте, где расположен апогей упругой поверхности пластины при ее потере устойчивости. Значение относительной координаты β_1 для этого положения приблизительно равно $\beta_0 \approx 0,5 - 0,15\gamma$ [2]. При таком расположении ребра должно быть

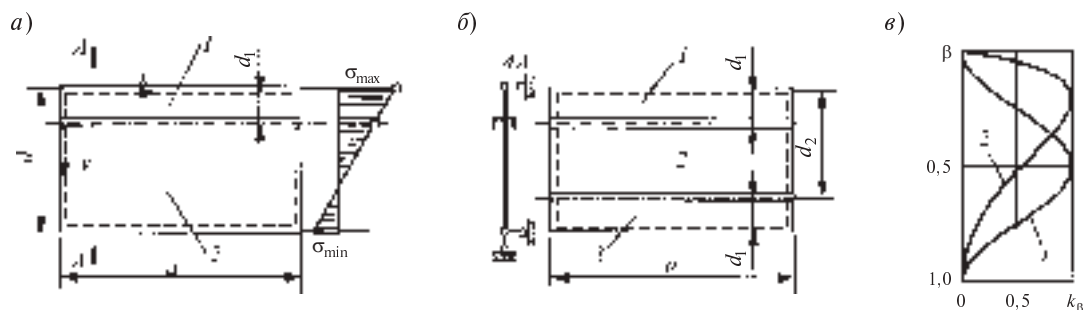


Рис. 2. Расчетная модель пластины с ребрами и график функции $k_\beta(\beta)$ (5) при $\gamma = 0$ (кривая 1) и $\gamma = 2$ (кривая 2)

$k_\beta = 1$; если же ребро смещено относительно оптимального положения, то $k_\beta < 1$. В предельном случае, если ребро оказалось на закрепленной продольной кромке пластины, $k_\beta = 0$. Этим условиям (рис. 2, в) удовлетворяет выражение

$$k_\beta = \sin^2 \left[\pi (\beta_1)^{1-0,28\gamma} \right]. \quad (5)$$

Для определения величин μ , d_c и проверки предлагаемой методики расчета критических напряжений при различных параметрах пластин и ребер были выполнены многочисленные расчеты устойчивости шарнирно закрепленных пластин с одним и двумя ребрами (рис. 2, а и б). Расчеты выполнялись в программе NEiNastran 9.1 (лицензия № NIW-1586-01910-6162). Параметры моделей варьировались в пределах $0,5 \leq a/d \leq 2$; $62 \leq d/t \leq 250$. Рассматривались случаи установки одного (331 расчет) и двух (50 расчетов) продольных двухсторонних ребер открытого сечения. Ребра располагались оптимальным и неоптимальным образом. В пластинах с одним ребром его положение варьировалось в интервале $\beta_1 = d_1/d = 0,1-0,9$. В пластинах с двумя ребрами они ставились симметрично относительно продольной оси пластины, т. е. $d_2 = d - d_1$ и $\beta_2 = d_2/d = 1 - \beta_1$, при этом $\beta_1 = 0,1-0,3$ (рис. 2, б). Варианты нагружения охватывали диапазон $0 \leq \gamma \leq 2$. В этом исследовании были приняты следующие допущения:

пластина — абсолютно плоская, а ребро — прямолинейное;

в конструкции отсутствуют остаточные сварочные напряжения;

материал конструкции — абсолютно упругий; нагружение системы — статическое.

На основании анализа полученных результатов предложено следующее выражение для вычисления критических напряжений для пластины с одним и двумя ребрами:

$$\sigma_c = \min \left\{ \begin{aligned} &\sigma_{cpr} = \sigma_{cp} + \frac{1,15\pi^2 EJ_r}{(1-0,6\gamma+0,15\gamma^2)a^2dt} \times \\ &\quad \times \left\{ \sin^2 \left(\pi \beta_1^{1-0,28\gamma} \right) + \sin^2 \left(\pi \beta_2^{1-0,28\gamma} \right) \right\}; \\ &\sigma_{c1} = \zeta_{S1} \left(1+0,42\gamma_1+0,52\gamma_1^3 \right) K_{S0} \left(\frac{t}{d_1} \right)^2; \\ &\sigma_{c2} = \zeta_{S2} \frac{1}{1-\gamma\beta_1} \left(1+0,42\gamma_2+0,52\gamma_2^3 \right) \times \\ &\quad \times K_{S0} \left(\frac{t}{d_2-d_1} \right)^2. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Коэффициенты учета защемления кромок равны $\zeta_{S1}=1,1$ и $\zeta_{S2}=1,2$. Значение параметра нагружения для первой панели — $\gamma_1 = \gamma\beta_1$, для

второй — $\gamma_2 = \frac{\gamma(\beta_2 - \beta_1)}{1 - \gamma\beta_1} \leq 2$. Неравенство озна-

чает, что если γ_2 получается больше 2, то в расчете по формуле (6) следует использовать $\gamma_2 = 2$

и $d_2 = \frac{2d}{\gamma} - d_1$. В этих выражениях для пластины

с одним ребром $d_2 = d$ и $\beta_2 = 1$.

Из условия (6) можно найти требуемое значение момента инерции ребра J_r , которое обеспечит устойчивость системы «пластина + ребро». При этом минимальное допустимое значение J_r в сварной конструкции обусловлено конструктивно-технологическими требованиями, согласно которым $J_r \geq 1,5 dt^3$ [1]. Получается

$$j_r = J_r/J_p \geq \frac{1,5 dt^3 12}{dt^3} = 18. \quad \text{Здесь } J_p = dt^3/12 —$$

момент инерции сечения пластины относительно вертикальной оси (см. рис. 2).

Результаты оценки погрешности вычисления критического напряжения по формуле (6) для пластин с одним ребром представлены в координатах $[\Delta; j_r]$ (рис. 3, а). Здесь $\Delta = \sigma_{cpr}/\sigma_{cpr FEM}$; σ_{cpr} и $\sigma_{cpr FEM}$ — значения критического напряжения, вычисленные по формуле (6) и методом конечных элементов. Как видно из графика, для пластин с одним ребром относительная погрешность в области $j_r \geq 18$ составляет $-40 \leq \Delta \leq +10 \%$. Результаты оценки расчетов критического напряжения для пластин с двумя ребрами показаны на рис. 3, б. В данном случае относительная погрешность в области $j_r \geq 18$ лежит в интервале $-32 \leq \Delta \leq +3 \%$.

График зависимости критического напряжения для пластины с ребром $\sigma_c = \min(\sigma_{cpr}, \sigma_{c1}, \sigma_{c2})$ от отношения $j_r = J_r/J_p$ имеет два участка (рис. 4, а) Первый из них соответствует случаям, когда менее устойчивым является ребро с пластиной (рис. 4, б), а второй — одна из панелей пластины (рис. 4, в, г). Используя выражение (6), можно найти пороговое значение момента инерции ребра J_r , при котором происходит перелом графика и дальнейшее увеличение J_r не влечет

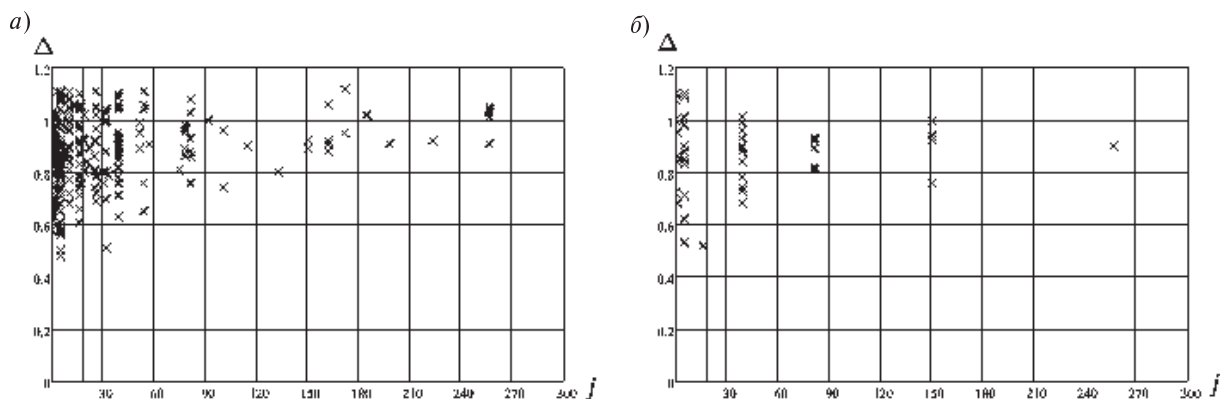


Рис. 3. Относительная погрешность предлагаемой методики
(а — при установке одного ребра; б — при установке двух ребер)

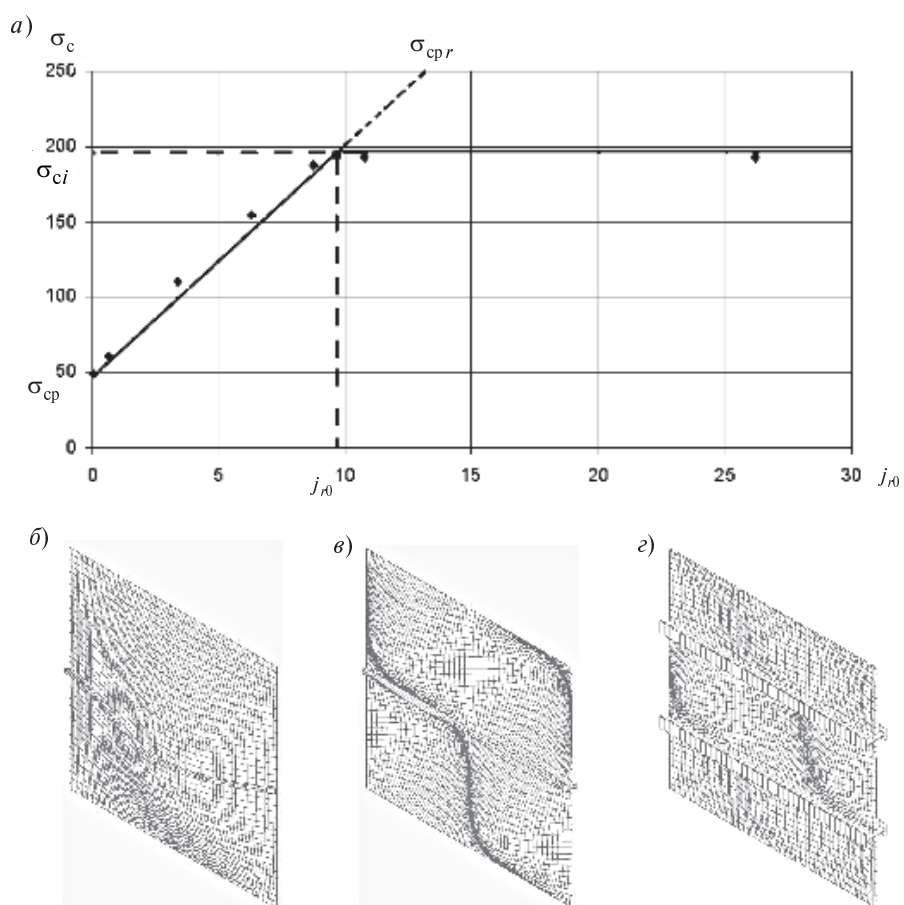


Рис. 4. Зависимость критических напряжений
пластины с ребром от параметра j_r (а)
и формы потери устойчивости при $j_r < j_{r0}$ (б) и $j_r > j_{r0}$ (в, г)

повышения устойчивости системы. Наибольшее значение σ_{ci} , которое получается при оптимальном расположении одного ребра (4), можно вычислить по рекомендации [2]:

$$\sigma_{cp} = (4 + 3,5\gamma^3) \zeta_s K_{s0} \left(\frac{t}{d} \right)^2. \quad (7)$$

Подставив (6) и (7) в равенство $\sigma_{cr} = \sigma_{cpr}$, можно получить оценку порогового значения момента инерции ребра или отношения $j_r = j_{r0}$ (рис. 4, а). Оно получается равным

$$j_{r0} = 3,8 \left(3 - 0,42\gamma + 3\gamma^3 \right) \times \\ \times \left(1 - 0,6\gamma + 0,15\gamma^2 \right) \zeta_s \alpha^2. \quad (8)$$

Верхняя граница значений моментов инерции ребра получается из условия $\sigma_{cpr} \leq \sigma_t$. Подставив это в первое уравнение (6) и считая, что ребро установлено оптимальным образом, получим

$$j_r \leq 10,4 \left(1 - 0,6\gamma + 0,15\gamma^2 \right) \times \\ \times \alpha^2 \left(\frac{\sigma_t}{\pi^2 E} \left(\frac{d}{t} \right)^2 - \frac{k_s \zeta_s}{3(1-\mu^2)} \right). \quad (9)$$

Предложенная методика дает возможность достаточно надежно оценить параметры размещения ребер и выбрать их рациональное сечение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Общие правила проектирования стальных конструкций. СП 53-102-2004 [Текст]. — СПб.: Изд-во ДЕАН, 2007.— 272с.
2. **Соколов, С.А.** Металлические конструкции подъемно-транспортных машин [Текст]: учебное пособие / С.А. Соколов. — СПб.: Политехника, 2005.— 423 с.
3. СНиП II-23-81* Стальные конструкции [Текст] / Госстрой России.— М.: ГУП ЦПП, 2000.— 96 с.
4. **Тимошенко, С.П.** Устойчивость упругих систем [Текст] / С.П. Тимошенко. М., Л.: ОГИЗ-Гостехиздат, 1946.— 532 с.
5. **Брауде, В.И.** Справочник по кранам: в 2-х т. [Текст] / В.И. Брауде, М.М. Гохберг, И.Е. Звягин [и др.]; Под общ. ред. М.М. Гохберга.— Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. — Т. 1. 536 с.

УДК 502.52

Н.В. Арефьев, В.Л. Баденко, Н.К. Латышев

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ГИДРОМЕЛИОРАТИВНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА И ПРИРОДООБУСТРОЙСТВА

Сложился ряд несоответствий между разработчиками информационных систем с расширенными аналитическими и модельными функциями (информационно-аналитические системы (ИАС)), создаваемых для поддержки принятия управленческих решений в области природообустройства, и лицами, принимающими решения, (ЛПР), которые пользуются такими системами. Разработчики все больше совершенствуют используемые информационные технологии (ИТ), зачастую включая в свои разработки элементы, которые могут быть оценены и поняты только специалистами в области ИТ. При этом пользователи все больше ориентируются на потребление знаний и хотят иметь в своем распоряжении ИАС, ориентированные на понятийный аппарат, специфический для их предметной области. Эти противоречия ведут к тому, что разрабатываемые ИАС с трудом внедряются в повседневную практику. Другая проблема: ИАС, разрабатываемые и используемые в природообустройстве, не являются комплексными, а решают частные задачи. Предлагаемый подход позволяет разрабатывать ИАС на принципах, вытекающих из фундаментальных законов развития географической оболочки, которая подвергается изменениям в процессе природообустройства. Такой подход будем называть геоэкологическими.

Кроме того, развитие многих идей по совершенствованию управления природообустройством, которые были высказаны в работах ученых-классиков, а также их практическая реализация стали возможными только в настоящее время, что обусловлено развитием новых ИТ и, в частности, технологий географических ин-

формационных систем (ГИС). При этом анализ существующей практики управления показывает, что одной из причин принятия недостаточно эффективных решений служит слабость, а иногда и полное отсутствие соответствующих ИАС, которые следует разрабатывать с учетом территориальной (пространственной) привязки.

В работе обобщен опыт разработки ИАС для поддержки принятия управленческих решений в области природообустройства. В каждой ИАС присутствуют некоторые особенности. Однако удалось сформулировать и общие принципы, которые могут быть применены ко всем видам природообустройства. В качестве примера практической реализации сформулированных методологических подходов рассмотрена ИАС для управления природно-аграрными геосистемами — сложными интегральными образованиями, состоящими из тесно взаимосвязанных природной и аграрной подсистем, функционирующих как единое целое. ИАС была создана для эталонной природно-аграрной геосистемы — Меньковской опытной станции Агрофизического НИИ (АФИ) Россельхозакадемии. Взаимодействие СПбГПУ с АФИ осуществляется в рамках филиала кафедры водохозяйственного и ландшафтного строительства, действующего в АФИ, а также в Научно-образовательном центре «Информационные технологии природообустройства», созданном в 2006 году в СПбГПУ совместно с АФИ.

Методологические основы

Прогресс в области ИТ предоставляет такие возможности по реализации ИАС, о которых совсем недавно нельзя было и мечтать. При этом

разрабатываемые ранее системы были ориентированы в первую очередь на понимание. А в современном мире круг лиц, использующих ИАС для поддержки принятия управленческих решений, значительно расширился, и ЛПР больше ориентируются не на понимание, а на потребление знаний. Если использовать современную терминологию, речь идет о необходимости создания для ЛПР некоторого виртуального мира, где можно было бы анализировать ситуацию и принимать виртуальные решения, которые потом будут реализовываться при решении задач природообустройства на конкретной территории. Далее будут рассмотрены основные геоэкологические подходы, которые должны определять структуру и функции ИАС. Будут сформулированы понятия, которые должны найти свое отражение в структуре данных ИАС и соответствовать понятийному аппарату ЛПР, что позволит построить для него в ИАС полностью воспринимаемый этим лицом виртуальный мир, отражающий реальный объект природообустройства.

Разработка ИАС для управления природообустройством требует системного междисциплинарного подхода к решению проблем гармоничного социально-эколого-экономического развития соответствующей территории, которую будем рассматривать как систему S_T , состоящую из трех подсистем — S_C (социальная), S_{Π} (природная), $S_{\mathcal{E}}$ (экономическая), а также взаимодействий между этими подсистемами — F_T и внутри каждой подсистемы — $F_C, F_{\Pi}, F_{\mathcal{E}}$, то есть

$$S_T = \{S_C, S_{\Pi}, S_{\mathcal{E}}, F_C, F_{\Pi}, F_{\mathcal{E}}, F_T\}. \quad (1)$$

При разработке ИАС для обеспечения управления S_T целесообразно выделить «главную» («ведущую») подсистему, обеспечение нормального функционирования которой служит определяющим фактором для остальных. В качестве такой подсистемы, по нашему мнению, следует выбрать S_{Π} — природную подсистему. При рассмотрении S_{Π} следует ориентироваться на методологические подходы, которые разработаны в географии. Среди наук о Земле именно география занимается комплексным изучением географической оболочки, при этом объектами ее исследования являются геосистемы — часть географической оболочки, в пределах которой элементы последней находятся в тесных отношениях и взаимосвязях между собой, образуя определенную целостность, единство [1]. Население и хо-

зяйство — важнейшие компоненты геосистем различного иерархического уровня, ибо на современном этапе развития общества почти вся географическая оболочка вовлечена в хозяйственную деятельность. Подавляющее большинство геосистем по своему генезису и характеру являются природно-антропогенными системами, типичный пример которых — природно-аграрные геосистемы.

Благодаря непрерывным процессам переноса (потокам) $\{P\}$ вещества и энергии между элементами $\{T\}$ возникают связи — $\{F\}$ (прямые и обратные). В результате чего образуются геосистемы S :

$$S = \{T, P, F\}. \quad (2)$$

В $\{T\}$ можно выделить подмножество $\{T_S\}$ системообразующих элементов, которые определяющим образом влияют на формирование S , а также $\{P\}$ и $\{F\}$. Именно $\{T_S\}$ важно для обеспечения целостности и функционирования геосистем любого иерархического уровня. Целесообразно ввести понятие ядра геосистемы — S_0 , которое пространственно ограничено той частью геосистемы, где ее свойства выражены наиболее ярко. При выделении пространственных границ S всегда будет присутствовать некоторая неопределенность: существует ядро — S_0 и переходные области — S_L , где свойства $S = S_0 \cup S_L$ не так четко выражены в силу взаимодействия и взаимовлияния со стороны соседних геосистем.

Множество P также целесообразно разбивать на подмножество P_E (процессы в элементах $\{T\}$) и P_S (собственные (системные) процессы, характеризующие изменения состава T и F). Среди P_S можно выделить P_{SV} (ведущие), в ходе которых изменяются T_S . Элементы $\{P\}$ обладают набором параметров, важнейшие среди которых — скорость (интенсивность) процесса, его характерное время, а также обратимость-необратимость.

Состояния геосистем — S' определяются на основе синтеза процессов изменения $\{T\}$ в конкретном пространстве-времени; согласно (2) это набор $S' = \{T', P', F'\}$. При этом следует рассматривать S' как пространственно-временную однородность, выделяемую по критериям сохранения $\{T_S\}$, $\{P_{SV}\}$ и $\{F\}$. Важнейшей характеристикой S' выступает длительность, в качестве единицы измерения которой удобно использовать год — период обращения Земли вокруг Солнца.



Для прогнозирования развития геосистемы следует определить $\{S'\}$ различной длительности и возможные переходы между состояниями: $S'_1 \rightarrow S'_2$. Переходы, которые имеют определенную длительность, также могут рассматриваться в качестве состояний в более крупном масштабе времени. Поэтому при выделении геосистем определенную роль играют особенности человеческого восприятия, а также задачи конкретного исследования.

Каждое из антропогенных воздействий, совокупность которых составляет процесс управления геосистемой, следует рассматривать как отправную точку последующих динамических траекторий Tr_S развития геосистемы: $S'_1 \rightarrow S'_2 \rightarrow \dots \rightarrow S'_N$. Любая Tr_S представляет собой последовательность длительно-временных состояний $Tr_S = \{S'_1, S'_2, \dots, S'_N\}$. Число возможных Tr_S в результате какого-либо воздействия определяется силой и длительностью последнего, а также $\{F\}$; согласно (2) вариантов тем меньше, чем более жестки связи и более ограничен в $\{T\}$ набор организмов, в первую очередь растений, что обычно характерно для агроэкосистем.

Наибольший интерес представляет рассмотрение годичных и более длительных состояний S' геосистем, которые зависят от геоэкологических ситуаций, складывающихся на территории геосистемы. Под геоэкологической ситуацией понимаются особенности функционирования элементов $\{T\}$, которые зависят от природопольвательской деятельности человека и влияют на средо- и ресурсовоспроизводящие функции геосистемы, сохранение ее видового разнообразия, а также условия жизни и деятельности людей [2]. Благоприятной следует считать такую геоэкологическую ситуацию, которая характеризуется стабильностью средо- и ресурсовоспроизводства, отсутствием черт деградации природной среды, высокой степенью адаптации населения к окружающей среде.

В соответствующих ИАС для оценки и прогноза геоэкологических ситуаций на территории геосистем, т. е. для описания $\{P\}$, следует использовать пространственно-распределенные модели процессов и явлений. Реализация таких моделей требует представления территории геосистемы S в виде набора однородных участков s_i . Например, множество s_i может представлять собой регулярную сетку квадратных ячеек. В этом случае при моделировании в каждой s_i

матрицы для характеристик m используются усредненные значения показателей. Однако при таком разбиении территории в пределах каждой s_i системные связи отсутствуют. Альтернативный подход предполагает использование геосистемного подхода при выделении s_i ; в их качестве следует использовать ландшафтные выделы различного иерархического уровня (фации, группы фаций, урочища и т. д.). Подобный подход позволяет более адекватно решать рассматриваемые здесь задачи.

В рассматриваемых ИАС основным инструментом для построения прогнозов развития геосистемы $S = \{T, P, F\}$ после проведения мероприятий природообустройства служит математическое моделирование. При этом S следует отнести к классу больших (сложных) систем. Для сложных систем характерно дублирование элементов $\{F\}$, и за счет этого достигается большая целостность; как правило, это системы, требующие модельного междисциплинарного подхода при их изучении. Основные проблемы моделирования S связаны с недостаточной изученностью фундаментальных свойств множеств T , P и F , поэтому перспективно применение методологии моделирования «от объекта к модели». Такому подходу соответствует метод имитационного математического моделирования. Суть его заключается в попытке формализации с помощью компьютерных технологий эмпирических знаний об изучаемом объекте или явлении на грани нашего понимания [3]. Это означает, что в процессе имитационного моделирования причинно-следственные связи необязательно прослеживаются до конца и для построения модели достаточно знать внешнюю сторону связей процессов и явлений, например A и B типа «если A , то B ». При этом не столь важно, почему произошло B , существенно, что оно произошло после A .

В ИАС для управления природообустройством имитационное моделирование следует в первую очередь использовать для описания $\{P\}$. При этом в них обычно рассматривается изменение векторной величины m (характеристики элемента $\{T\}$) при воздействии $x(t)$. Правило,

позволяющее вычислить реакцию S : $\frac{dm}{dt}$, если известно $x(t)$, можно записать в виде дифференциального уравнения

$$\frac{dm}{dt} = f(m, x), \quad (3)$$

которое в разностной форме имеет вид

$$m^{j+1} = m^j + j(x^j, m^j), m^{j=0} = m^0, \quad (4)$$

где $m^0, m^1, \dots, m^j, m^{j+1}$ — значения характеристик в $0, 1, \dots, j, j+1$ -м моментах времени; соответственно $x^0, x^1, \dots, x^j, x^{j+1}$ — значения переменных воздействия на геосистему в те же моменты времени; j — номер шага по времени, $j = 0, 1, \dots, N$. При использовании таких моделей в ИАС ЛПР задает различные варианты воздействий x — сценарии, соответствующие определенной геоэкологической ситуации, и, оценивая ее по тому, как меняются характеристики m , принимает решение по выбору или отклонению данного воздействия x .

При разработке рассматриваемых здесь ИАС одна из главных задач — отыскание критериев для оценки принадлежности как отдельных компонентов $\{T\}$, так и геосистемы $S = \{T, P, F\}$ в целом к тому или иному состоянию. Эти критерии показывают благоприятность геоэкологической обстановки и служат по существу интегральными показателями, характеризующими основные свойства каждого компонента $\{T\}$. Вопрос об интегральных показателях в науке рассматривается уже давно, однако удовлетворительного решения пока нет. Ясно, что эти показатели должны отражать $\{T_S\}$. При этом S как сложным системным образованиям свойственно скачкообразное изменение их поведения при переходе $S'_1 \rightarrow S'_2$. Помимо естественнонаучной содержательности интегральные показатели, определяющие $\{S\}$, имеют и математическое обоснование в теории нечетких множеств [4]. При этом их следует рассматривать как оценочные категории, характеризующие степень принадлежности изучаемого объекта к какому-либо состоянию.

Адекватным формальным описанием поведения $S = \{T, P, F\}$ на основе определения связей между интегральными показателями является алгоритм как таковой, который в этом случае представляется в виде дискретной схемы типа

$$\begin{aligned} &\text{критерий} \rightarrow \text{состояние} \rightarrow \\ &\quad \rightarrow \text{воздействие} \rightarrow \\ &\quad \rightarrow \text{отклик (изменение состояния)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Такой подход эквивалентен формализации процесса оценки и прогнозирования поведения

сложной системы, применяемого в экспертных системах. Использование в ИАС методологии экспертных систем позволяет в рамках компьютерного эксперимента проверить сформированные на основе экспертных оценок предположения и допущения о специфике поведения и структуре S . Кроме того, такой подход дает широкие возможности для применения качественных методов принятия управленческих решений.

Анализ показывает, что в рамках имитационного моделирования пока не удалось решить многие проблемы прогнозирования развития геосистем. Это связано, прежде всего, с трудностями решения проблем идентификации моделей. Будем различать задачу идентификации в широком и узком смысле. Наибольшие успехи достигнуты в решении задачи идентификации в узком смысле, когда известна структура модели и основная проблема состоит в выполнении значительных объемов натурных экспериментов для определения необходимых параметров. При идентификации в широком смысле априорная информация об объекте очень бедна, а структура модели неизвестна. Последняя ситуация достаточно характерна для современного состояния наук о Земле, где накоплена значительная качественная информации, использование которой крайне затруднительно. Остаются также проблемы упрощения описания природных объектов специфическими методами типа уравнения диффузии, а также проблемы размерности и шага численного интегрирования. Поэтому необходимо развивать старые и искать принципиально новые приемы, позволяющие формализовать и алгоритмизировать описание геосистем, а также организовать актуализацию информации для обеспечения работы моделей.

Применение разработанной методологии

Чтобы апробировать разработанную методологию, рассмотрим ИАС для информационной поддержки принятия управленческих решений по природообустройству на территории природно-аграрной геосистемы — Меньковской опытной станции (МОС) АФИ, расположенной в Ленинградской области. ИАС разрабатывается для ЛПР — руководителей МОС, имеющих сельскохозяйственное образование, которым понятны и близки геоэкологические подходы, заложенные в основу построения ИАС. Структура ИАС определяется согласно изложенной выше мето-



дологии. ИАС состоит из социальной, природной и экономической подсистем, при этом ведущей является природная. Сельскохозяйственные поля как системообразующие элементы — основа базы данных (БД) для ИАС. Пространственное положение сельхозполей во многом определяет стратегию природообустройства, поэтому было принято решение разрабатывать ИАС на базе ГИС-технологий.

Согласно используемой терминологии цель создания ИАС — информационная поддержка принятия управленческих решений, которые направлены на анализ складывающихся геоэкологических ситуаций. Для обеспечения благоприятных геоэкологических ситуаций на полях МОС внедряются технологии точного земледелия [5], которые позволяют поддерживать состояния природно-аграрной геосистемы, определяющиеся целым рядом параметров, например содержанием гумуса. Благополучие МОС как природно-аграрной геосистемы определяется урожаем, поэтому важнейшим процессом P_L является производственный процесс сельскохозяйственных культур. Собственные системообразующие процессы P_S представлены технологиями обработки сельхозполей, которые определяются разработанными для МОС севооборотами; на их информационную поддержку и направлены основные функции ИАС. Севообороты (семипольные) — также основа для определения состояния геосистемы, естественной длительностью которого считается год, а длительновременные состояния имеют продолжительность 7 лет. Поэтому в ИАС включены функции по оценке состояния природно-аграрной геосистемы — ежегодные и через 7 лет. В ИАС контролируется ежегодное состояние сельхозполей (T_S) путем формирования соответствующих процессов (P_{SV}) и поддержания устойчивых связей (F).

После указанного структурирования ИАС была начата разработка природной подсистемы и ее ведущего процесса — роста сельскохозяйственных культур. ВАФИ разработана система имитационного моделирования производственного процесса сельскохозяйственных растений Agrotool [6], образующая семейство моделей. Именно в таких моделях сосредоточены наши знания о процессах и явлениях в окружающей природной среде, а также об их влиянии на рост растений и формирование урожая. Модели семейства Agrotool описывают сезонную динамику продук-

ционного процесса сельскохозяйственных культур от момента сева до полного созревания. Они имеют блочную структуру и включают в себя описание процессов, идущих в системе «почва — растительный покров — приземный слой воздуха».

Для включения уже готовой системы имитационного моделирования в среду ГИС, основу ИАС, пришлось решить ряд проблем, общий подход к решению которых может быть использован и для других моделей. Agrotool по своей сути — «точечная» модель и поэтому раньше использовалась для всего поля (оно рассматривалось как однородное). Это находится в противоречии с предлагаемым нами геоэкологическим подходом. Неоднородность сельхозполей проявляется, например, при уборке урожая дифференцированным способом современной техникой. До недавнего времени основные усилия ученых по совершенствованию управления производством сельхозпродукции были направлены на решение задач, связанных с разработкой и внедрением новых технологий на отдельных полях. Основное внимание уделялось агрохимическому состоянию почв и условиям почвенного питания сельскохозяйственных растений. Однако одной вариативностью агрохимических свойств почв объяснить вариативность урожая по сельскохозяйственному полю не удастся: необходимо учитывать и агрофизические показатели почвы. Решение комплексной задачи по одновременному учету влияния агрохимических и агрофизических показателей на продуктивность агроэкосистем возможно в рамках интеграции ГИС и Agrotool, что и было осуществлено при разработке ИАС.

Итак, ключевая проблема по включению в ИАС уже готовой имитационной модели сводится к проблеме интеграции Agrotool и БД ГИС ИАС. Реализованная в виде программного кода Agrotool представляет собой не более чем формализованный алгоритм рекуррентного пошагового пересчета вектора состояния динамических характеристик агроэкосистемы сельскохозяйственного поля [6]. Если обозначить за $x(k)$ вектор переменных состояния системы на k -м шаге, то создание модели эквивалентно определению эволюционного оператора f :

$$\begin{aligned} x(k+1) &= f(x(k), a, w(k), u(k)), \\ x(0) &= x_0, k = 0, 1, \dots, T-1, \end{aligned} \quad (6)$$

где k — номер шага счета, $x(k)$, $x(k+1)$ — векторы состояния модели на двух соседних шагах; a — вектор статических параметров модели, $w(k)$ —

вектор неконтролируемых внешних воздействий (погода); $u(k)$ — вектор управляющих воздействий (агротехника); x_0 — начальное условие. В этих соотношениях T — время окончания процесса моделирования, обычно совпадающее с днем уборки урожая. Расчет по модели производят путем многократного применения оператора f_k вектору начального состояния и наблюдения эволюции исследуемой системы во времени. Для работы модели необходимо задать значения вектора параметров a , которые могут меняться по площади сельскохозяйственного поля и определяют пространственную вариабельность результатов работы модели. Поэтому значения вектора параметров a должны извлекаться из пространственной БД ГИС. Также в БД ГИС должны помещаться результаты расчетов по модели для дальнейшего анализа в ИАС и передачи на другие подсистемы. Можно сказать, что так имитационная модель превращается в интеллектуальное ядро ИАС, обеспечивая реализацию концепции устойчивого земледелия и, в частности, устойчивого развития природно-аграрной геосистемы МОС.

Первый этап на пути интеграции модели Agrotool и ГИС — построение пространственной БД ГИС, достаточно полно отражающей вариабельность характеристик сельскохозяйственных полей. Среда ГИС позволяет выделять однородные с точки зрения геоэкологии участки сельскохозяйственного поля, которые в технологии точного земледелия называются единицами управления (ЕУ). По всей территории ЕУ применяются одинаковые агротехнологии, которые меняются только от одной ЕУ к другой. Если определение агрохимических показателей для каждой ЕУ не представляет особого труда, то агрофизические параметры можно найти только в ограниченном числе точек, так как их определение достаточно трудоемко. Поэтому авторами разработаны специальные алгоритмы пространственного анализа, позволяющие рассчитать агрофизические параметры во всех ЕУ по значениям этих показателей всего в нескольких точках отбора образцов.

Второй этап разрабатываемого метода — разработка способа передачи параметров ЕУ, хранящихся в БД ГИС, в БД Agrotool. Такой алгоритм разработан и успешно прошел тестирование. В результате возник инструмент для проведения экспериментов с имитационной моделью, который позволяет ЛПР подбирать эффективные агротехнологии (выбирать варианты развития природно-аграрной геосистемы), адаптированные к вариабельности как агрохимических, так и агрофизических свойств почв сельскохозяйственного поля.

По состоянию на весну 2010 года можно говорить о разработке общей структуры ИАС и природной подсистемы. Продолжается ее доработка и наполнение БД ГИС. Другие подсистемы будут реализовываться по схожей технологии — путем включения уже готовых программных модулей в существующую структуру ИАС с использованием общей БД ГИС.

Заключение

В работе обобщен многолетний опыт авторов по созданию и внедрению ИАС на базе ГИС для информационной поддержки принятия управленческих решений [7–9] в области природообустройства и природопользования. При этом основные трудности внедрения были связаны не с техническими проблемами, а с организационными. Организационные проблемы, в частности, могли бы решаться быстрее, если бы ИАС по своей структуре и функциям была ближе к понятийному аппарату конечного пользователя — ЛПР. В этой связи для новой ИАС были сначала сформулированы геоэкологические подходы, а затем началась разработка. Первые результаты показывают, что авторы находятся на верном пути. Интеграция уже готовых решений в структуру ИАС, основанную на принципах, по которым функционирует окружающая природная среда, — магистральный путь разработки ИАС для управления природообустройством, в частности — на территории природно-аграрных геосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Заиканов, В.Г.** Геоэкологическая оценка территорий [Текст] / В.Г. Заиканов, Т.Б. Минакова. — М.: Наука, 2005. — 319 с.
2. **Жекулин, В.С.** Введение в географию [Текст] / В.С. Жекулин. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. — 272 с.
3. **Моисеев, Н.Н.** Математические задачи системного анализа [Текст] / Н.Н. Моисеев. — М.: Наука, 1981. — 488 с.
4. **Badenko, V.** Fuzzy algorithms to support spatial planning [Текст] / V. Badenko, D. Kurtener // Chapter



14 in Geertman, S. and Stillwell, J. (eds.) Planning support systems in practice.— Springer, Berlin.— 2002.— P. 249–265.

5. **Якушев, В.П.** Информационное обеспечение точного земледелия [Текст] / В.П. Якушев, В.В. Якушев.— СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН, 2007.— 384 с.

6. **Полуэктов, Р.А.** Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур [Текст] / Р.А. Полуэктов, Э.И. Смоляр, В.В. Терлеев, А.Г. Топаж.— СПб.: Изд-во СПбГУ, 2006.— 396 с.

7. **Арефьев, Н.В.** Бассейново-ландшафтный подход к организации экологического мониторинга гидроэнергокомплексов на основе геоинформационных технологий [Текст] / Н.В. Арефьев, В.Л. Баденко, Г.К. Осипов // Гидротехническое строительство.— 1998.— № 11.— С. 25–27.

8. **Арефьев, Н.В.** Информационное обеспечение управления комплексным природопользованием [Текст] / Н.В. Арефьев, В.Л. Баденко, Г.К. Осипов // Региональные аспекты теории и практики природопользования / Под ред. О.П. Литовки, М.П. Федорова.— СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000.— С. 40–68.

9. **Арефьев, Н.В.** Методические подходы к созданию информационно-аналитических систем на базе геоинформационных технологий для поддержки управления водными ресурсами [Текст] / Н.В. Арефьев, В.Л. Баденко, Г.В. Баденко // Строительство: Труды СПбГПУ.— № 502.— 2008.— С. 171–178.

УДК 631.4

А.Д. Горбовская, К.А. Бахматова, Н.Н. Матинян

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЗАКАЗНИКА «ЛАММИН-СУО»

«Ламмин-Суо» — региональный гидрологический заказник расположенный на территории Выборгского района Ленинградской области, площадь его составляет 380 га. Эта особо охраняемая природная территория имеет особое научное, эстетическое и рекреационное значение.

Обследование почвенного покрова заказника и оценка его экологического состояния с использованием морфологических, физико-химических и биологических методов исследования проводились в период с 2000 по 2009 год. В результате проведенных исследований были выявлены основные разновидности лесных и антропогенно-нарушенных почв и на базе полученных материалов составлена почвенная карта. Для изучения морфологии почв, а также определения их физико-химических свойств были заложены разрезы и из генетических горизонтов отбирались почвенные образцы. Пробы для изучения биологической активности отбирались из деятельного горизонта почв (до 25 см). Анализ проб проводился общепринятыми методами [1, 3, 7]

Исследуемая территория представлена характерными для Карельского перешейка природными ландшафтами и почвенно-растительным покровом. Центральную часть заказника занимает

верховое грядово-мочажинное болото Ламмин-Суо, расположенное в озерной котловине; в его массиве сохранились три первичных озера глубиной до 12 м. Наиболее высокая часть болотного комплекса превышает его окраины на 4 м. Возраст болота составляет 5–7 тысяч лет. Верховое грядово-мочажинное болото имеет большое природное значение, которое заключается в сохранении и поддержании гидрологического баланса прилегающей территории, видов специфической болотной фауны и флоры.

С севера и востока болото окружают возвышенности, сложенные песками водно-ледникового генезиса: озы и камы. Абсолютные отметки здесь достигают 65–70 (до 77) м над уровнем моря. Вдоль восточного края болота тянется озовая гряда, шириной 500–600 м и длиной около 3 км. В южной части заказника рельеф значительно менее контрастный, представляющий собой пониженную равнину с немногими слабо выраженными повышениями. Абсолютные отметки — 50–55 м над уровнем моря.

Территория заказника относится к Карельской провинции [2, 4], для которой характерно преобладание пород легкого гранулометрического состава, на них формируются подзолы и под-

буры разной степени оглеения и оторфованности. В составе почвенного покрова заказника преобладают торфяные олиготрофные почвы. Они залегают одним крупным гомогенным контуром в центральной части заказника. Контур имеет вытянутую форму, унаследованную от очертаний водоема ледникового периода. Эти почвы сформировались в результате развития олиготрофной растительности в процессе зарастания водоема. Торфяная залежь состоит преимущественно из фускум- и сфагново-пушицевого торфа, а в придонном слое — из сосново-пушицевого и соснового торфа. Степень разложения верхних горизонтов торфа — 0–5 %, средних — 20–40 %, а нижних — до 80 %. Средняя глубина залежи — 1,9 м, а максимальная — 4,3 м [5].

Болотный массив дренируют несколько ручьев, самым крупным из которых является Южный. По долинам ручьев в условиях притока минерализованных грунтовых вод небольшими контурами встречаются иловато-перегнойные глеевые почвы. Их ареалы имеют линейную или лопастную форму, слабо расчленены и занимают небольшую площадь. Почвы характеризуются наличием темноокрашенного перегнойного горизонта, обогащенного тонкодисперсными минеральными частицами, которые поступают с делювиальными водами.

К югу, юго-востоку и юго-западу от болотного массива на плоской равнинной территории распространены торфянистые и торфяные подзолы глеевые. Длительное избыточное увлажнение этих почв приводит к формированию с поверхности торфяного горизонта мощностью до 30 см (у торфянистых) и от 30 до 50 см (у торфяно-подзолов).

Торфянистые подзолы залегают крупными нерасчлененными контурами. К ареалам этих почв приурочены ельники, черничники, зеленомошные или сфагновые. В ельниках отмечена незначительная примесь сосны и березы. Торфяно-подзолы глеевые занимают наиболее пониженные участки территории, которые дополнительно обводнены поверхностными водами. Они залегают линейно-вытянутыми сильно расчлененными ареалами, соседствуя с торфяными почвами и торфянистыми подзлами.

Подзолы иллювиально-железистые распространены на выровненных возвышенных участках. На относительно пониженных ровных участках в южной и юго-восточной частях заказника их

сменяют подзолы иллювиально-железистые глееватые. Признаки оглеения характерны для нижней части профиля этих почв.

На сложенных песчаными отложениями возвышенностях — озовых грядах и камовых холмах — формируются подбуры. Подбуры и подзолы относятся к отделу альфегумусовых почв, но подбуры в отличие от подзолов не имеют обособленного элювиального горизонта. Подзолы и подбуры в заказнике формируются на одних и тех же породах, но в развитии подзолистого горизонта важную роль играет дополнительное поверхностное или грунтовое увлажнение, а в условиях хорошего дренажа формируются подбуры. В заказнике встречаются подбуры оподзоленные грубогумусированные, оподзоленные и иллювиально-железистые. На подбурях грубогумусированных развиваются елово-сосновые леса с примесью березы и рябины, в напочвенном покрове преобладают черника (60 %) и зеленые мхи (30 %). Выделен единственный контур дерново-подбура, приуроченный к вершине кама. Для него характерно наличие гумусового горизонта наряду с альфегумусовым. Формирование дерново-подбуров связано с антропогенным воздействием. На этих участках после пожара и вырубki произошло изреживание древостоя, вследствие чего существенную роль в напочвенном покрове оказала травянистая растительность, которая и способствовала формированию гумусово-аккумулятивного горизонта.

Современное антропогенное воздействие на ландшафты заказника проявляется в виде рекреационной нагрузки, интенсивность которой возрастает по берегам озер, вдоль дорог и троп. Влияние рекреации проявляется в виде уничтожения подстилки, уплотнения почв; при наличии уклона это ведет к усилению эрозионных процессов. Встречаются участки загрязненные бытовым мусором, а также почвы в состоянии естественного восстановления после антропогенного воздействия. Эти участки приурочены к линиям электропередач и трассе газопровода. В настоящее время здесь под изреженной растительностью, представленной мхами и лишайниками, сформированы слаборазвитые почвы — псаммоземы. Под линией малой ЛЭП почвенный покров при строительстве подвергся турбации и сейчас под хорошо развитым покровом травянистых растений и кустарников распространены дерново-подзолы турбированные.

По гранулометрическому составу почвы заказника, как и породы, на которых они сформированы, представляют собой пылеватые супеси и пески. Содержание частиц песчаных и крупнопылеватой фракций варьируется по профилю, что свидетельствует о неоднородных условиях седиментации.

Все исследованные почвы заказника — кислые (pH 4,0–4,5), в верхней части профиля — сильнокислые (табл. 1). Насыщенность

основаниями составляет 20–40 %. Распределение гумусовых веществ по профилю — типичное для альфегумусовых лесных почв, с максимумами в поверхностном горизонте и горизонте ВНФ, быстро убывающее книзу. В альфегумусовых почвах отчетливо проявляется элювиально-иллювиальное распределение соединений железа и алюминия. Оподзоленные горизонты отличаются наименьшей насыщенностью обменными основаниями,

Таблица 1

Физико-химические свойства почв заказника «Ламмин-Суо»

Название почвы	Горизонт	Глубина, см	Гумус, %	pH_{KCl}	Ca, Mg	Hг	V, %
Р.1. Подбур оподзоленный	O	0-3	92,39*	2,8	21,3	102,0	17
	E	3-4	5,21	3,0	19,2	8,5	69
	ВНФ	4-7	3,35	3,6	14,4	8,3	63
	BF1	18-30	1,57	4,3	1,7	2,8	38
	BF2	30-49	Не опр.	4,3	1,1	1,7	39
	BC	49-51	Не опр		0,9	1,3	41
	C1	70-80	Не опр	4,6	1,3	0,6	68
	C2	90-110	Не опр		1,3	0,4	76
Р.2. Дерново-подзол иллювиально-железистый	O	0-4	84,52*	3,5	34,0	102,0	25
	AYe	4-10	4,74	2,9	1,5	11,3	12
	E	10-25	0,24	3,4	0,1	1,3	7
	BF1	25-33	1,55	4,2	0,1	4,9	2
	BF2	33-55	0,77	4,6	1,3	2,1	38
	BC	55-106	Не опр	4,5	0,6	1,5	29
Р.7. Дерново-подбур	O	0-4	87,86*	3,0	46,8	76,5	38
	AYe	4-10	7,02	2,9	7,9	8,5	48
	ВН	10-12	3,29	4,8	3,6	8,1	28
	BF1	12-28	0,91	3,7	0,9	3,2	22
	BF2	40-60	Не опр	3,6	0,9	3,6	20
	BC	72-83	Не опр	4,3	1,9	1,7	53
	C	83-105	Не опр	4,5	0,9	1,3	41
Р.16. Торфянистый подзол иллювиально-гумусовый глеевый	O	0-3	95,91*	2,8	12,8	102,0	11
	T1	3-6	98,00*	2,8	14,9	102,0	13
	T2	6-12	75,50*	3,0	17,0	102,0	14
	Eg	12-26	0,33	3,7	0,2	2,3	8
	ВНг	26-32	18,87	4,0	4,5	27,1	14
	BFg	32-49	0,98	4,5	1,7	3,0	36
	Gox	49-71	Не опр	4,5	0,9	1,5	38
	CG	80-100	Не опр	4,6	0,4	1,1	27
Р.18. Торфяный подзол иллювиально-гумусовый глеевый	O	0-10	99,20*	3,0	25,5	127,5	17
	T1	10-23	96,15*	3,0	25,5	102,0	20
	T2h	23-32	75,90*	3,4	23,4	102,0	19
	Eg	32-46	4,09	4,2	1,7	3,8	31
	ВНг	46-56	4,20	4,2	0,1	6,8	1
	BG	56-80	Не опр	4,4	0,1	2,6	4

а по валовому составу — обеднены всеми элементами за исключением кремния.

Различия в физико-химических свойствах почв сказываются на их биологической и ферментативной активности. Наиболее активные биологические процессы приурочены к верхней части профиля, где сосредоточены основные запасы доступной микроорганизмам органической пищи (подстилочные и гумусово-аккумулятивные горизонты). В почвах нормального увлажнения максимум биологической активности отмечается осенью, когда почвы обогащены свежим растительным материалом. Весной биологическая активность также довольно высока, но снижается в период летнего иссушения почв. Однако в почвах избыточного увлажнения максимум биологической активности, напротив, отмечается в летние месяцы. Среди критериев биологической активности почв наиболее показательны степень разложения целлюлозы, нитратонакопление, интенсивность почвенного дыхания, накопление аминокислот, а также активность почвенных ферментов — каталазы, уреазы, инвертазы (табл. 2).

Изучение активности целлюлозолитических процессов показало, что наиболее интенсивно они протекают в дерново-подбурях (р.7) и дерново-подзолах турбированных (р.17). Эти почвы содержат больше обменных оснований и являются наименее кислыми по сравнению с другими, что способствует более интенсивному разложению растительных остатков. Коэффициент положительной корреляции между интенсивностью разложения целлюлозы и величиной pH составляет 0,82, а между разложением целлюлозы и содержанием гумуса — 0,55. Наиболее низкая активность разложения целлюлозы отмечена в подбуре оподзоленном (р.20). Почти во всех антропогенно-нарушенных почвах, целлюлозолитическая активность очень слабая.

Активность нитратонакопления достаточно высокая в подбурях грубогумусированных, дерново-подзолах иллювиально-железистых, дерново-подбурях (р. 1, 2, 7). Это связано с повышенным содержанием в поверхностных горизонтах этих почв легкоразлагаемых органических соединений. На остальных участках, особенно в антропогенно-нарушенных почвах, активность нитратонакопления значительно ниже.

Изучение почвенного дыхания показало, что почти во всех изученных почвах оно достаточно интенсивное, за исключением торфянистых под-

золов глеевых (р. 16) и подбуров оподзоленных (р. 20), где оно несколько ниже. Во всех антропогенно-нарушенных переуплотненных почвах вследствие высокой рекреационной нагрузки интенсивность дыхания очень низкая.

Максимальная интенсивность накопления аминокислот наблюдается в дерново-подбурях (р. 7). Самые низкие значения этого показателя отмечены на антропогенно-нарушенных участках. Выявлена положительная корреляция между интенсивностью накопления аминокислот и кислотностью почвы, а также содержанием гумуса (соответственно 0,88 и 0,62).

Во всех исследованных лесных почвах активность инвертазы значительно выше, чем в почвах на участках с высокой рекреационной нагрузкой. Максимальные значения активности отмечены в дерново-подбурях (р. 7) и дерново-подзолах турбированных (р. 17). Достаточно высокая активность инвертазы выявлена в торфянистых (р. 16) и торфяных (р. 18) подзолах глеевых. Активность фермента каталазы незначительно варьирует по всем исследованным участкам. Выявлена положительная корреляция между содержанием гумуса и активностью каталазы ($K = 0,72$). Максимальная активность уреазы отмечена в подбурях грубогумусированных (р. 1), дерново-подбурях (р. 7) и дерново-подзолах турбированных (р. 17). На антропогенно-нарушенных участках активность инвертазы, каталазы и уреазы очень слабая.

Использованные биохимические методы оценки почв показали, что наиболее высокой биологической активностью обладают дерново-подбуры и подбуры грубогумусированные. На всех антропогенно-нарушенных участках биологическая активность почв очень низкая, что связано с деградацией на этих участках гумусированного горизонта и снижением запасов органического вещества. Таким образом, рекреационная нагрузка, вызывающая уничтожение напочвенной растительности, разрушение поверхностных органно-аккумулятивных горизонтов, ухудшение водно-физических, физико-химических свойств почв, резко снижает биологическую активность.

Проведенная в завершение работ интегральная оценка устойчивости почвенного покрова к антропогенным нагрузкам [6] по методу В.Д. Васильевской показала, что из всех изученных почв на территории заказника к категории с минимальной устойчивости следует отнести дерново-подбуры, торфяно-подзолы глеевые и дерново-подзолы турбированные.

Таблица 2

Биологическая активность почв заказника «Ламмин-Суо»

Название почвы, Номер разреза	Нитрато- накопление мгNO ₃ /г почвы	Накопление аминокислот, мг глицина/ г почвы	Дыхание, CO ₂ /кг/га/час	Разложение целлюлоз, %	Активная каталаз KMnO ₄ / г почвы	Активная уреаз NH ₃ / г почвы	Активная инвертаз глюкоза/ г почвы
Подбур оподзоленный (р.1)	0,15	0,0024	2,284	13,04	8,87	1,64	20,45
Дерново-подзол иллювиально- железистый (р.2)	0,14	0,0046	1,829	9,24	8,75	1,15	25,14
Дерново-подбур (р.7)	0,20	0,0099	1,935	29,59	9,65	2,12	46,61
Торфянистый подзол иллюви- ально-гумусовый глеевый (р.16)	0,07	0,0037	1,282	6,55	8,59	1,23	28,06
Дерново-подзол турбированный (р.17)	0,09	0,0046	3,041	31,81	9,50	1,88	55,13
Торфянистый подзол иллюви- ально-гумусовый глеевый (р.18)	0,06	0,0049	1,537	11,01	8,50	1,28	38,76
Подбур оподзоленный (р.20)	0,08	0,0024	1,382	4,87	8,30	1,43	11,42
Подбур* оподзоленный, вытоп- танный участок (р.19)	0,05	0,0020	1,372	3,46	8,25	1,36	10,74
Подзол иллювиально- железистый турбированный, свалка бытовых отходов (р.29)	0,02	0,0012	1,097	2,47	7,12	0,98	6,79
Подбур оподзоленный, вытоп- танный участок (р.31)	0,07	0,0012	1,205	2,19	7,50	1,16	8,00
Псаммозем на линии ЛЭП (р.32)	0,03	0,0009	0,686	1,84	6,62	0,94	6,17

*Выделены фоном антропогенно-нарушенные почвы

Природопользование

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галстян, А.Ш. Определение активности ферментов почв [Текст] / А.Ш. Галстян.— Ереван, 1978.
2. Добровольский, Г.В. География почв [Текст] / Г.В. Добровольский, И.С. Урушевская.— М., 2004.
3. Звягинцев, Д.Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии [Текст] / Д.Г. Звягинцев.— М., 1991
4. Классификация и диагностика почв России [Текст].— М., 2004.
5. Носков, Г.А. Заповедная природа Карельского перешейка [Текст] / Г.А. Носков.— СПб., 2005.
6. Орлов, Д.С. Почвенно-экологический мониторинг [Текст] / Д.С. Орлов, В.Д. Васильевская.— М., 1994.
7. Растворова, О.Г. Химический анализ почв [Текст] / О.Г. Растворова, Д.П. Андреев, Э.И. Гагарина [и др.].— СПб., 1995.

УДК 532.517.4

Е.А. Маркелова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА БИОДЕСТРУКЦИИ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ВОДНОЙ СРЕДЫ

Удаленность нефтеперерабатывающих комплексов от мест освоения шельфовых месторождений и от потребителя приводит к необходимости развития средств транспорта нефти на большие расстояния. В процессе транспорта нефти и нефтепродуктов как по трубопроводам, так и нефтеналивными средствами приходится преодолевать водные преграды: реки, моря, эстуарии и т. п. При интенсивной эксплуатации транспортной сети высока опасность техногенных аварий и катастроф, сопровождающихся выбросами нефти и нефтепродуктов в окружающую среду, разливами нефти на водной поверхности больших акваторий.

В настоящее время используются различные способы и средства сбора разлившейся на воде нефти. Боновые заграждения и нефтесборщики, будучи первой ступенью очистки, собирают толстый слой нефти с возможностью дальнейшей ее утилизации. Но остаточное, в виде тонких пленок, количество нефти и нефтепродуктов после первичной очистки превышает нормы ПДК, и вода не соответствует стандартам качества. Для удаления более тонкого (пленочного) слоя нефти применяют химические и биологические средства.

Один из эффективных и экологически безопасных методов ликвидации тонких нефтяных пленок — это использование биосорбента. Процесс разложения нефтяного загрязнения биосорбентом называется биодеструкцией.

Биосорбент состоит из двух компонентов: пассивный компонент — носитель — представляет собой полидисперсный порошок. На поверхности каждой частицы носителя закреплены (иммобилизованы) микроорганизмы. Сообщество этих микроорганизмов образует микрофлору — активный компонент биосорбента, разлагающий нефть. Порошок носителя имеет развитую поверхность для увеличения количества активного компонента на каждой частице.

Поскольку частицы носителя микрофлоры должны выполнять функцию поплавка, то как правило полидисперсный порошок изготавливают из пористого материала.

Носители остаются все время на поверхности воды и также в некоторой степени способствуют удалению нефтяной пленки, выполняя сорбционную функцию. Не перерабатывая нефть, частицы носителя обеспечивают снижение максимальной концентрации только за счет дрейфового конвективного переноса поверхностным слоем воды (турбулентная дисперсия). Этот вклад в удаление нефтяной пленки из расчета биохимической очистки поверхности воды исключаем.

После насыщения биосорбента нефтью микрофлора отделяется от носителя и образует самостоятельные агрегаты, имеющие сложную геометрическую форму. Форма и размеры агрегатов микрофлоры определяются действием таких взаимонезависимых факторов, как:



состояние водной среды (наличие поверхностных течений, ламинарный или турбулентный режим, наличие поверхностных волн и т. п.);

толщина ликвидируемой нефтяной пленки;

характеристики используемого биосорбента (его диспергированность, биологический состав и активность микрофлоры);

плотность подачи биосорбента на единицу площади нефтяной пленки.

Первоначально эти агрегаты имеют отрицательную плавучесть и осаждаются в воде под действием сил тяжести.

Скорость осаждения агрегатов микрофлоры зависит от плотности, формы и размеров частиц, количества абсорбированной ими нефти, а также от температуры и солености воды. Все эти факторы будем оценивать интегрально, используя понятие гидравлической крупности — скорости равномерного осаждения отдельной частицы под действием сил тяжести в достаточно большом объеме покоящейся воды. Эта величина устанавливается экспериментально.

На поверхности осаждающейся частицы (агрегата микрофлоры) происходит биохимическое разложение нефти до простейших веществ — воды и углекислого газа. Углекислый газ выделяется на поверхности частицы в виде пузырька. Образовавшийся пузырек CO_2 в процессе осаждения не покидает частицу, а остается на ее поверхности. В результате появления пузырька (или нескольких пузырьков) и их роста средняя плотность агрегата микрофлоры уменьшается. При этом скорость осаждения частиц вначале уменьшается, а затем частицы останавливаются, приобретают положительную плавучесть и начинают всплывать.

По мере приближения к свободной поверхности давление воды уменьшается, и объем пузырьков газа увеличивается в дополнение к их росту за счет биохимической реакции. Достигнув свободной поверхности, агрегат микрофлоры теряет пузырек, вновь насыщается нефтью, приобретает отрицательную плавучесть и осаждается.

В результате многократного осаждения и всплытия на поверхность одного и того же агрегата микрофлоры возможно экономичное использование биосорбента для ликвидации нефтяных загрязнений, заключающееся в его уменьшенной подаче на свободную поверхность. При этом на процесс осаждения/всплытия агрегатов микрофлоры будут накладываться факторы турбулентности.

Целью нашего исследования было установление влияния турбулентности на время биодеструкции нефтяного загрязнения при экономичном использовании биосорбента.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

1) разработать математическую модель процесса движения частиц агрегатов микрофлоры с учетом скорости собственного осаждения / всплытия агрегатов микрофлоры и влияния естественной турбулентности водной среды;

2) установить параметры математической модели экспериментальным определением скорости и времени осаждения/всплытия агрегатов микрофлоры в результате биохимического взаимодействия с нефтью и путем сбора данных о параметрах турбулентности окружающей среды на основе литературных источников.

3) численно реализовать математическую модель.

В условиях естественных водоемов на многократное осаждение и последующее всплытие частиц накладывается их рассеяние за счет переноса с вертикальными пульсациями скорости, т. е. турбулентной диффузией. В реках характеристики рассеяния определяются естественной турбулентностью руслового потока, а в озерах, морях, эстуариях — турбулентностью приповерхностного сдвигового слоя, рождающегося под действием ветра.

В настоящей работе горизонтальную конвекцию из рассмотрения исключаем и рассматриваем одномерную модель рассеивания агрегатов микрофлоры в вертикальном направлении под влиянием двух факторов:

осаждения и всплытия за счет биохимического разложения нефти;

переноса с пульсационными скоростями, т. е. турбулентной диффузии.

В связи с необходимостью учета нескольких факторов (изменяющаяся во времени плавучесть агрегатов микрофлоры, турбулентность водной среды и т. д.) при математическом описании этого процесса используется модель диффузии с конечной скоростью (ДКС).

Для формулировки модели введем следующие допущения:

1. Скорость осаждающихся агрегатов микрофлоры W_0 постоянна. Процесс деградации агрегатов микрофлоры носит случайный характер, в результате чего частица в произвольный момент времени может изменить свое направление движения, т. е. начать всплывать.

2. При всплывании частицы имеют постоянную скорость W_B и всегда достигают свободной поверхности. На свободной поверхности они за короткий промежуток времени (пренебрежимо малый по сравнению со временем осаждения и всплытия) снова насыщаются нефтью и начинают осаждаться.

3. В турбулентном потоке в процессе осаждения и всплытия частицы переносятся хаотически движущимися объемами воды, в которых они содержатся. Таким образом, на осаждение и всплывание агрегатов микрофлоры накладывается перенос вверх и вниз с вертикальными пульсациями скорости U'_z . Начало координат расположено на свободной поверхности, а ось Z направлена вверх.

Характерная вертикальная пульсационная скорость жидкого объема, переносящего частицу биосорбента, определяется значениями вертикальных пульсаций скорости в турбулентном потоке. Было принято значение составляющей скорости частиц, обусловленной турбулентностью, равное стандарту пульсаций:

$$U''_z = \sqrt{(U'_z)^2}.$$

Период вертикальных пульсаций скорости во много раз меньше, чем характерное время осаждения и всплытия частиц.

В соответствии с этими допущениями прием следующую модель ДКС: частицы подразделяются на четыре сорта, концентрацию каждого из которых обозначим ϑ_j , $j = 1, 2, 3, 4$. Очевидно, что физическая концентрация агрегатов микрофлоры $\vartheta = \sum_{j=1}^4 \vartheta_j$.

$$\vartheta = \sum_{j=1}^4 \vartheta_j.$$

Частицы 1-го сорта осаждаются со скоростью W_0 и поднимаются вверх за счет вертикальных пульсаций скорости U''_z . Частицы 2-го сорта осаждаются со скоростью W_0 и дополнительно опускаются с вертикальной пульсацией

скорости $-U''_z$. Частицы 3-го сорта всплывают со скоростью W_B и дополнительно поднимаются со скоростью U''_z . Частицы 4-го сорта всплывают со скоростью W_B и опускаются с пульсационной скоростью $-U''_z$.

Таким образом, частицы разных сортов движутся со следующими возможными скоростями (рис. 1):

$$U^{(1)} = -W_0 + U''_z;$$

$$U^{(2)} = -W_0 - U''_z;$$

$$U^{(3)} = W_B + U''_z;$$

$$U^{(4)} = W_B - U''_z.$$

Частицы изменяют свою скорость и при этом переходят из одного сорта в другой с определенной частотой. Под частотой будем понимать количество M частиц в единичном объеме, которые в единицу времени изменяют сорт i на сорт j . Введем две основные частоты изменения сорта частиц. Первая из них $\omega^{(c)}$ обратно пропорциональна периоду осаждения и всплытия частиц. Она определяет переход осаждающихся частиц (ϑ_1 и ϑ_2) во всплывающие (ϑ_3 и ϑ_4). Вторая частота $\omega^{(t)}$ определяется турбулентным режимом движения. С этой частотой частицы, переносимые со скоростью U''_z вверх, начинают двигаться с такой же скоростью, но вниз. Это частота, с которой концентрация частиц ϑ_1 меняется на ϑ_2 , и ϑ_3 — на ϑ_4 ; она определяется с помощью энергетического спектра вертикальных пульсаций скорости [4].

Дифференциальные уравнения ДКС

В соответствии с вышеизложенным система уравнений ДКС примет вид

$$\frac{\partial \vartheta_i}{\partial t} + U_z^{(i)} \frac{\partial \vartheta_i}{\partial z} = \sum_{j=1}^4 \omega_{ij} \vartheta_j - \alpha \vartheta_i, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, 3, 4$,

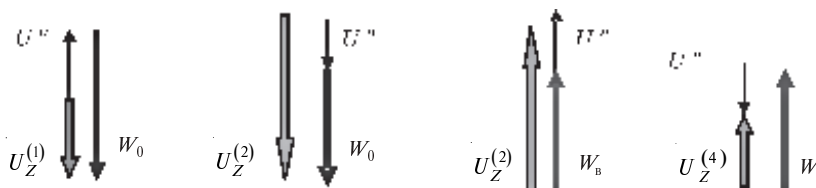


Рис. 1. Возможные скорости движения агрегатов микрофлоры



$$\omega_{ij} = \begin{pmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \omega_{13} & \omega_{14} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \omega_{23} & \omega_{24} \\ \omega_{31} & \omega_{32} & \omega_{33} & \omega_{34} \\ \omega_{41} & \omega_{42} & \omega_{43} & \omega_{44} \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} -(2\omega^{(c)} + \omega^{(\tau)}) & \omega^{(\tau)} & \omega^{(c)} & \omega^{(c)} \\ \omega^{(\tau)} & -(2\omega^{(c)} + \omega^{(\tau)}) & \omega^{(c)} & \omega^{(c)} \\ \omega^{(c)} & \omega^{(c)} & -(2\omega^{(c)} + \omega^{(\tau)}) & \omega^{(\tau)} \\ \omega^{(c)} & \omega^{(c)} & \omega^{(\tau)} & -(2\omega^{(c)} + \omega^{(\tau)}) \end{pmatrix}.$$

Граничные условия на свободной поверхности. Пусть на свободную поверхность акватории площадью A поступает m кг активного компонента биосорбента в течение T секунд. При рассмотрении одномерной задачи плотность потока q частиц в процессе подачи биосорбента будет равна

$$q = \frac{m}{TA}.$$

Будем считать, что частицы за пренебрежимо малый промежуток времени (по сравнению с T) насыщаются нефтью и начинают погружаться. Этому соответствуют граничные условия при $0 < t < T$

$$\left. \begin{aligned} \vartheta_1^0 &= \frac{q_1}{U^{(1)}}; \\ \vartheta_2^0 &= \frac{q_2}{U^{(2)}}; \end{aligned} \right\}$$

где $q_1 = q_2 = \frac{q}{2}$.

Кроме того, на свободной поверхности при $t > 0$ начинают появляться всплывающие частицы, плотность потока которых равна

$$q_3 = \vartheta_3 U^{(3)},$$

$$q_4 = \vartheta_4 U^{(4)}.$$

Эти частицы, насытившись нефтью, превращаются в осаждающиеся. В результате при $t > 0$ возникает поток частиц 1-го и 2-го сорта со следующими концентрациями:

$$\vartheta_1^r = \frac{q_3 + q_4}{2U^{(1)}},$$

$$\vartheta_2^r = \frac{q_3 + q_4}{2U^{(2)}}.$$

В итоге на свободной поверхности имеем при $0 < t < T$

$$\vartheta_1 = \vartheta_1^0 + \vartheta_1^r,$$

$$\vartheta_2 = \vartheta_2^0 + \vartheta_2^r;$$

при $t > T$

$$\vartheta_1 = \vartheta_1^r,$$

$$\vartheta_2 = \vartheta_2^r.$$

Граничные условия на дне определяем исходя из возможности двух случаев:

1) частицы, достигнув дна, отражаются и переходят во всплывающие. Тогда:

$$\vartheta_3 = \vartheta_4 = -\frac{U_Z^1 \vartheta_1 + U_Z^2 \vartheta_2}{2W};$$

2) все частицы, достигшие дна, там и остаются. Следовательно, на дне при $t > 0$ имеем $\vartheta_3 = \vartheta_4 = 0$.

Для численного решения системы уравнений (1) необходимо экспериментально определить: величины скоростей осаждения и всплытия агрегатов микрофлоры; характерный период цикла осаждения/всплывания агрегатов микрофлоры; величины постоянной деградации.

Описание экспериментальной установки

Опыты по осаждению/всплыванию частиц в воде проводились на специальной установке, собранной на кафедре морских и воднотранспортных сооружений Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Установка представляет собой две вертикально установленные колонки, сделанные из прозрачного стекла толщиной 1,5 см, диаметр каждой колонки — около 20 см, длина — 2,8 метра. На каждой колонке была прикреплена метрическая лента с ценой деления 1 мм. Обе колонки устанавливались на подставку, в которой имелись два сливных отверстия с клапанами, по одному под каждой колонкой. Для улучшения видимости частиц в воде за колонки был заведен темный фон, сделанный из черной матовой бумаги. С противоположной стороны колонок была прикреплена подсветка всей установки.

Для проведения экспериментов каждая колонка заполнялась водой фиксированной солености. Для взвешивания растворяемой в воде соли использовались технические весы с ценой

деления 0,1 г. Исходя из возможных значений солености естественных водоемов выбирался соляной режим воды каждого эксперимента: 0, 20 и 40 ‰. Повышение солености от 0 до 20 ‰ и более производилось путем слива воды и добавления в нее соли.

Для создания стандартных стационарных состояний воды (покоящаяся жидкость, фиксированная соленость и температура) после заполнения водой установка оставлялась на несколько часов. Эксперименты проводились в следующих температурных режимах воды: 5, 15 и 20 °С. Термостатирование эксперимента при низких температурах воды проводилось при помощи поддержания низкой температуры в помещении. Для этого серия экспериментов проводилась в зимнее время. Равномерность температуры воды вдоль всей колонки обеспечивалась турбиной, которая двигалась внутри колонки по всей ее глубине. Температура измерялась в одной точке на поверхности воды в начале и в конце эксперимента ртутным термометром ТМЗ-2 с ценой деления 0,1 °С. Расхождение начальной и конечной температур воды не превышало 1,5 °С.

Подготовка исследуемых материалов к эксперименту

Подготовка нефтепродуктов. В качестве нефтепродукта использовалось моторное масло марки 10W-40 вязкостью $9 \frac{\text{мм}^2}{\text{с}}$. Плотность масла

составила $0,81 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$. Количество подаваемого на поверхность воды нефтепродукта рассчитыва-

лось исходя из заданной толщины нефтяной пленки (10^{-5} м).

После достижения стационарных состояний воды на ее поверхность мерной пипеткой с ценой деления 0,1 мл подавалось рассчитанное количество нефтепродукта (3 мл на каждую колонку). После создания на воде нефтяной пленки на свободную поверхность при помощи сита равномерно по площади подавался подготовленный биосорбент.

Подготовка биосорбента. Агрегат микрофлоры представляет собой сообщество штаммов микроорганизмов-деструкторов нефти, таких, как *Fusarium species* № 56; *Rhodococcus erythropolis* ВКМ АС-13391; *Pseudomonas putida* ВКМ 1301; *Bacillus subtilis* 446 С.- П; *Nacordia rubra*; *Candida sake* и др.

Агрегаты микрофлоры были разделены по фракциям на фракционном сите с величиной зерна от 10 до 0,1 мм. Объемный вес фракции

меньшей 0,1 мм, равен $0,21 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

Проведенные предварительные эксперименты показали, что фракции 5 и 10 мм не тонут при насыщении нефтью. Фракция 2 мм осаждается, но не всплывает. Частицы размером 0,2 мм и меньше налипают на другие фракции и самостоятельно не функционируют. Поэтому в качестве исследуемого материала брались агрегаты микрофлоры размером 1; 0,5 и 0,25 мм. Частицы каждой из указанных фракций исследовались отдельно.

Результаты и выводы

После статистической обработки экспериментальных данных выяснилось, что наибольшую гидравлическую крупность имеют части-

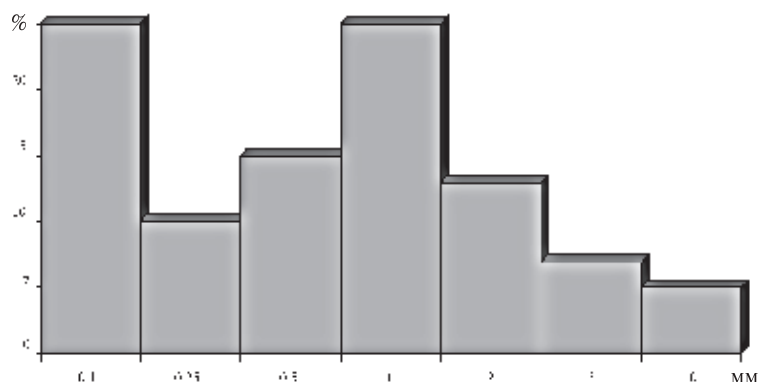


Рис. 2. Фракционный состав агрегатов микрофлоры

цы размером 1 мм при 20 °С и 10 ‰ солености, среднюю гидравлическую крупность имеет фракция 0,5 мм при 5 °С и 0 ‰; а наименьшую — фракция 0,25 мм при 5 °С и 10 ‰. Значения гидравлической крупности при других значениях температур и соленостей лежат в этом интервале.

Увеличение температуры окружающей среды и размера частиц приводит к увеличению скорости осаждения/всплытия частиц биосорбента. Увеличение солености воды приводит к уменьшению скорости осаждения частиц. С увеличением солености до 20 ‰ частицы биосорбента всплывают только при температуре 20 °С. При любых температурах и солености воды 40 ‰ частицы ни одной фракции не всплывают.

Полученные данные в ходе экспериментального изучения были использованы при численном моделировании.

Целью численного моделирования была оценка влияния турбулентности окружающей среды на процесс биодеструкции нефтяной пленки. Турбулентность характеризовалась величиной вертикальных пульсационных скоростей U_z'' водного потока, характерной частотой турбулентных пульсаций $\omega^{(T)}$ и глубиной водоема L . Зависимость времени удаления нефтяной пленки биосорбентом от величины турбулентных пульсаций представлена на рис. 3. По оси абсцисс отложена величина отношения пульсационной скорости к средней гидравлической крупности биосорбента, а по оси ординат — отношение времени биодеструкции нефтяной пленки к времени намокания биосорбента в нефти.

С увеличением скорости турбулентных вертикальных пульсаций потока в 4 раза время, не-

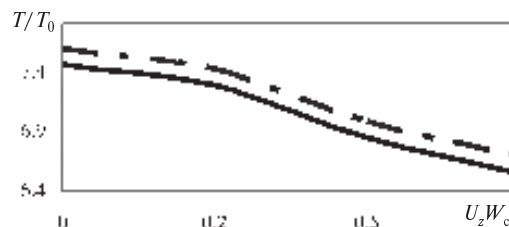


Рис. 3. Влияние вертикальных пульсаций на время биодеструкции нефтяной пленки:

— при отражающем дне;
— ■ — при поглощающем дне

обходимое на биодеструкцию нефтяной пленки, сократилось на 10 %. Причем при условии отражения частиц биосорбента дном времени на биодеструкцию нефтяной пленки требуется на 2 % меньше, чем при поглощении.

Зависимость времени биодеструкции нефтяного пятна от характерных частот турбулентных вертикальных пульсаций скорости потока представлена на рис. 4. По оси абсцисс отложено отношение характерных частот вертикальных пульсаций к собственной частоте частиц биосорбента, имеющих среднюю гидравлическую крупность. Увеличение характерных частот вертикальных пульсаций в 3,5 раза приводит к увеличению времени биодеструкции нефтяного пятна на 7–8 %. При условии отражения частиц биосорбента дном времени требуется на 2 % меньше, чем при поглощении.

Влияние глубины на время биодеструкции нефтяного пятна отражено на рис. 5.

По оси абсцисс отложено отношение глубины к значению, равному 100 см. В ходе численного моделирования было установлено, что при любом взаимодействии донной поверхности

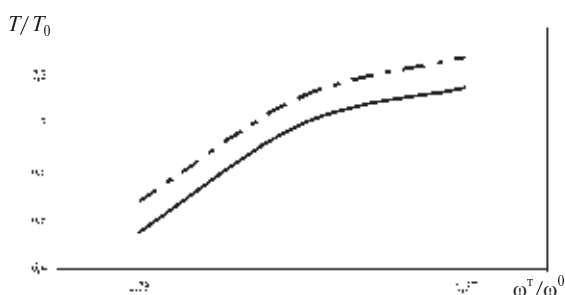


Рис. 4. Влияние характерных частот на время биодеструкции нефтяной пленки:

— при отражающем дне;
— ■ — при поглощающем дне

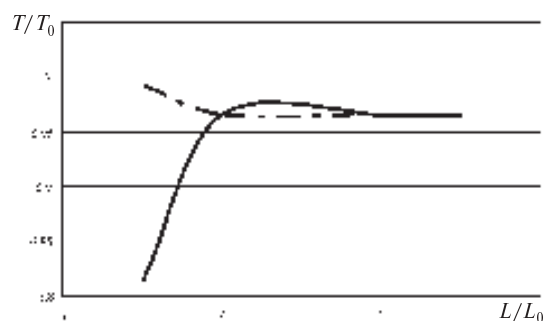


Рис. 5. Влияние глубины на время биодеструкции нефтяной пленки:

— при отражающем дне;
— ■ — при поглощающем дне

с биосорбентом глубина свыше 2 метров на время разложения нефтяной пленки не влияет и время биодеструкции остается неизменным. Однако при глубине меньше 2 метров наблюдается некоторое влияние взаимодействия дна с частицами биосорбента на время биодеструкции нефтяного пятна. Так, при отражающем дне происходит сокращение времени биодеструкции нефтяного пятна, а при поглощающем дне — его увеличение.

Таким образом, предлагаемое решение задачи впервые позволяет описать картину диффузии частиц биосорбента для широкого спектра условий турбулентного водного потока с учетом влияния таких факторов, как тип взаимодействия дна с биосорбентом, время и схема намокания биосорбента в нефти, фракционный со-

став биосорбента, толщина нефтяной пленки и т. д. Численное решение задачи проводилось при экономичной подаче биосорбента на нефтяное загрязнение. При реализации задачи использовалось 50 % от необходимого разового количества биосорбента, возможного в силу его гидравлических характеристик. Как видно из вышеприведенных графиков, изменение исследуемых параметров турбулентности приводит к различному изменению времени биодеструкции нефтяного загрязнения.

Характер изменения времени биодеструкции от того или иного рассматриваемого фактора будет представлен в разрабатываемых в данный момент рекомендациях по экономичному использованию биосорбента в различных условиях водной среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Альхименко, А.И.** Аварийные разливы нефти в море и борьба с ними [Текст] / А.И. Альхименко.— СПб., 2004.— 230 с.
2. **Березин, И.К.** Оптимизация природоохранных мероприятий при ликвидации аварийных разливов нефти (на примере акватории Санкт-Петербурга) [Текст]: дис. ... канд. техн. наук /

И.К. Березин.— 2005.

3. **Гиргидов, А.Д.** Механика жидкости и газа [Текст] / А.Д. Гиргидов.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004.— 545 с.

4. **Гиргидов, А.Д.** Турбулентная диффузия с конечной скоростью [Текст] / А.Д. Гиргидов.— СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1996.— 260 с.

УДК 532.517.4: УДК 62-784

К.И. Стрелец

О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПЫЛИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ РАСЧЕТЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕУДАЛЕНИЯ В ЦИКЛОНЕ

При определении эффективности пылеудаления и целесообразности применения того или иного пылеуловителя важную роль играют свойства взвеси, т. е. пыли, подлежащей удалению из газового потока. Для разработки математических моделей оценки эффективности пылеулавливания необходимо учитывать характеристики частиц пыли и взаимодействие их с потоком газа. Если в качестве пылеуловителей используются фильтры, определяющая характеристика для их выбора — геометрические параметры частицы (диаметр). В случае циклонов наиболее часто ис-

пользуются следующие характеристики: плотность частиц, их геометрические размеры (диаметр) и форма.

Когда форма частиц отлична от сферической, вводится в расчет $d_{\text{экв}}$ — эквивалентный диаметр, значение которого разные исследователи устанавливают по-разному. Например, Штокман (1998) принимает за $d_{\text{экв}}$ расстояние между двумя самыми удаленными точками частицы. В этом случае значение диаметра представляется изначально завышенным. Пирумов (1981), Шияев (1999) предлагают принять эквивален-



тний диаметр $d_{\text{экв}}$ равным диаметру шара с такой же, как у данной частицы, массой или плотностью, равной плотности материала.

Использование эффективного диаметра как основной характеристики частиц при математическом моделировании осаждения частиц в циклоне связано с возможностью применения формулы Стокса. При этом в расчете возникают следующие неточности:

принимая эквивалентный диаметр частиц, не учитывают влияние формы частиц на их гидравлическое сопротивление;

введение эффективного диаметра с целью использования формулы Стокса может применяться только в случае мелких частиц, движение которых обеспечивает число Рейнольдса, меньшее единицы, $Re < 1$. Для более крупных частиц использование эффективного диаметра не имеет смысла;

не учитывается возможность взаимодействия частиц друг с другом в потоке газа;

для учета взаимодействия частиц с потоком газа и определения времени их релаксации следует вводить в расчет плотность материала, а это может создать погрешность связанную с тем, что плотность материала отлична от эффективной плотности частиц, ибо в случае частиц сложной конфигурации, должна учитываться масса вовлеченного в движение газа.

При создании математической модели для расчета эффективности пылеудаления целесообразно воспользоваться опытом расчета осаждения частиц, используемым в гидрологии, и принять в качестве основной характеристики частицы гидравлическую крупность w — скорость падения под действием силы тяжести отдельной частицы в достаточно большом объеме покоящейся жидкости (газа). Эта величина интегрально учитывает различные факторы, такие, как размер и форма частиц, вязкость жидкости (газа), относительная плотность частиц и др. В гидрологии рассматривается осаждение частиц под действием силы тяжести, поэтому будем называть эту величину гравитационной гидравлической крупностью w_g (в литературе встречается название аэродинамический диаметр Жонгчао Тан (2004)).

При расчете гравитационных отстойников полагают, что не только в покоящейся воде, но и в турбулентном потоке скорость оседания взвешенной частицы в переносащем ее жидком объе-

ме относительно этого объема равна гравитационной гидравлической крупности w_g . Для расчета эффективности циклонов будет использоваться то же допущение.

Значение гравитационной гидравлической крупности можно определить теоретическим и экспериментальными способами.

Теоретическим способом гравитационную гидравлическую крупность частиц можно получить, приравняв разность сил тяжести и архимедовой значению силы лобового сопротивления при равномерном падении частицы со скоростью w :

$$\rho_{\text{ч}} \frac{\pi d^3}{6} g - \rho_{\text{ж}} \frac{\pi d^3}{6} g = c_x \frac{\rho_{\text{ж}} w^2}{2} \frac{\pi d^2}{4},$$

где $\rho_{\text{ч}}$ — плотность частиц; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости; d — диаметр частицы; c_x — коэффициент силы сопротивления;

$$w = \frac{4}{3} \frac{\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}} \frac{g d^2}{c_x Re_d \nu},$$

где $Re_d = \frac{w d}{\nu}$.

Для мелких частиц ($Re_d < 1$), когда справедлива формула Стокса $c_x = \frac{24}{Re_d}$, получим

$$w = \frac{1}{18} \frac{\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}} \frac{d^2}{\nu} g.$$

Для крупных частиц ($Re_d > 100$) можно принять $c_x = 0,47$ и получить

$$w = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}} \frac{g d}{c_x}}.$$

Для модели движения частицы в циклоне введем понятие центробежной гидравлической крупности $w_{\text{цб}}$, которая представляет собой скорость квазиравномерного движения частицы относительно переносащего ее объема газа под действием центробежной силы, возникающей вследствие криволинейности траектории движения переносащего ее объема. Очевидно, что в поле центробежной силы те же рассуждения приведут к аналогичной зависимости центробежной гидравлической крупности $w_{\text{цб}}$ от центробежного

ускорения $\frac{u_{\text{е}}^2}{r}$.

Выразим центробежную гидравлическую крупность через гравитационную следующими зависимостями:

для мелких частиц

$$w_{цб} = \frac{u_{\varepsilon}^2}{gr} w;$$

для крупных частиц

$$w_{цб} = w \sqrt{\frac{u_{\varepsilon}^2 g}{r}}.$$

При пересчете гравитационной гидравлической крупности w в центробежную гидравлическую крупность $w_{цб}$ следует убедиться, что числа Re_d , определяемые для w и $w_{цб}$, относятся к одной и той же области сопротивления (стоксовой и квадратичной). Для практических расчетов можно принять, что границей этих областей является $Re_d = 10$ (Гиргидов, 2004). Задача определения характерного геометрического размера (эквивалентный диаметр) необходима только для установления области сопротивления. Для практических целей оценки эффективности циклона важно удаление частиц минимального размера, которые относятся к стоксовой области сопротивления.

Вводимая в математическую модель осредненная радиальная скорость движения частицы к стенке циклона под действием центробежной силы принимается равной величине центробежной гидравлической крупности.

Универсальным способ определения гравитационной гидравлической крупности частиц — ее измерение экспериментальным путем.

В этом случае следует измерить скорость падения различных видов частиц под действием силы тяжести, т. е. проще всего установить время, за которое отдельная частица (выделяющаяся из источника загрязнения) под собственным весом пройдет фиксированное расстояние по вертикали, которое назовем базой экспериментальной установки.

Находящаяся первоначально в состоянии покоя частица падает ускоренно до того момента, когда сила сопротивления среды уравнивает силу тяжести (Михалев, 2008). Время, в течение которого частица приобретет равномерное движение, называется временем релаксации частицы (Гиргидов, 1996):

$$t_r = k \frac{w}{g},$$

где $k = 1$ — для мелких частиц, когда число Рейнольдса Re_d относится к стоксовой области сопротивления, для крупных частиц $k = 1,8$, когда число Рейнольдса Re_d относится к квадратичной области сопротивления

При проведении экспериментов более удобной характеристикой служит расстояние l_r , которое должна пройти частица, чтобы начать двигаться равномерно; назовем эту величину длиной релаксации частиц. Минимальное значение этой величины

$$l_r = w t_r = k \frac{w^2}{g}.$$

Таблица 2

Гравитационная гидравлическая крупность модельных частиц w , м/с

Номер измерения	Для частиц пудры	Номер измерения	Для частиц муки	Номер измерения	Для частиц манной крупы
1	0,25	1	0,47	1	0,94
2	0,13	2	0,64	2	1,64
3	0,19	3	0,70	3	1,09
4	0,14	4	0,29	4	0,99
5	0,18	5	0,46	5	0,90
6	0,17	6	0,70	6	1,16
7	0,18	7	0,64	7	1,79
8	0,14	8	0,39	8	0,94
9	0,15	9	0,47	9	1,64
w_{cp}	0,15	w_{cp}	0,51	w_{cp}	1,5



Верхняя отметка базы должна быть ниже отметки поступления частиц в среду на величину l_p ; для этого необходимо задать базу (высотой 1–2 м). Длина базы определяется в зависимости от рода пыли таким образом, чтобы обеспечить приемлемую точность измерения времени прохождения базы. Необходимое условие — движение частицы от верхней отметки базы до нижней с постоянной скоростью, равной гравитационной гидравлической крупности w . В зависимости от рода пыли необходимо установить приемы фиксации прохождения частиц через верхнюю и нижнюю отметку базы при равномерном движении частицы.

При проведении модельных испытаний была задана база 1,95 м. Для определения времени, когда частица, двигаясь равномерно, проходит длину релаксации, использовался секундомер и видеосъемка с последующей компьютерной обработкой материалов.

В качестве модельных частиц использовались частицы пудры, муки и манной крупы, длины релаксации l_r , которых составляют соответственно 0,006, 0,05 и 0,3 м.

Полученные результаты для гравитационной гидравлической крупности модельных частиц приведены в табл. 2.

Актуальным является исследование удаления из воздуха твердых частиц, образующихся при сварочном производстве. Часть этих частиц может продолжать движение, сохраняя высокую температуру, что приводит к процессу окисления (горения), другая часть представляет собой «холодную» металлическую пыль. Для горящих частиц измерение диаметра или плотности не имеет смысла или не представляется возможным, так как такая частица имеет твердую и газообразную составляющие, и единственный способ получения характеристик частиц — это измерение их гравитационной гидравлической крупности.

Здесь, как и при других видах пыли, наиболее надежные результаты можно получить с по-



Рис.1 Измерение гравитационной гидравлической крупности w частиц пыли, выделяющихся при сварке

Таблица 3

Гравитационные гидравлические крупности натуральных частиц

Номер измерения	w , м/с	Номер измерения	w , м/с	Номер измерения	w , м/с	Номер измерения	w , м/с
1	6,25	1	4,38	1	4,00	1	3,83
2	3,75	2	5,50	2	4,69	2	4,25
3	6,00	3	4,00	3	5,00	3	5,00
4	4,50	4	3,75	4	5,08	4	4,75
5	3,50	5	4,25	5	4,64	5	4,25
6	3,61	6	4,25	6	5,17	6	4,75
7	5,42	7	4,00	7	4,06	7	3,50
8	4,06	8	3,75	8	3,38	8	5,75
9	3,75	9	4,00	9	3,45	9	4,25
10	3,89	10	4,25	10	3,30	10	3,75
w_{cp}	4,41	w_{cp}	4,21	w_{cp}	4,41	w_{cp}	4,57

мощью натурного эксперимента. В качестве источника загрязнения использовалось сварочное производство, а в качестве примеси — металлические частицы, образующаяся при электро-сварке. При проведении натурного эксперимента было установлено, что гравитационная гидравлическая крупность горящих частиц имеет порядок 1–4 м/с и, следовательно, длина релаксации частиц l_r , имеет порядок 0,5–1,5 м (рис. 1).

Результаты измерения гравитационной гидравлической крупности w для частиц сварочной пыли, полученные при натурном эксперименте, приведены в табл. 3.

Полученные средние значения мало отличаются друг от друга в различных сериях опытов, среднеквадратическое отклонение составляет не более 15 %.

Влияние фракционного состава в данном случае учитывать нецелесообразно, так как частицы ведут себя по-разному.

Следует учитывать, что свойства частиц различны для различных производств и зависят от индивидуальных особенностей сварочного оборудования, материалов и технологии сварки.

Проведенные испытания показали простоту методики. Результаты испытаний имеют частный характер и приведены в качестве примера.

Использование предложенных способов измерения и вычисления гравитационной гидравлической крупности w позволяет исключить из расчета эффективности пылеулавливания в циклоне погрешности, связанные с определением

эффективного диаметра и эффективной плотности, что повышает достоверность оценки технической эффективности аппарата.

Понятие гидравлической крупности широко используется в гидрологии, что объясняется простотой выражения этой величины для взвешенных частиц в различных средах. Например, при расчете песчаных наносов характеристики воды постоянны, ее плотность и вязкость неизменна (при температуре 20 °С), форма взвешенных песчинок близка к сферической, гравитационная гидравлическая крупность для частиц песка в жидкости зависит только от диаметра частиц. Достаточно установить зависимость гидравлической плотности от диаметра частиц и свести результаты в табличную форму.

В случае пыли все значительно сложнее: прежде всего, гидравлическая крупность зависит от плотности материала и варьируется от 500 кг/м³ (для дерева) до 7000 кг/м³ (для металла), а в случае «несферичности» частиц — от эффективной плотности, кроме того, в зависимости от температуры меняется вязкость воздуха в широком диапазоне, а фракционный состав пыли значительно более разнообразный. Поэтому гидравлическую крупность следует устанавливать экспериментально для каждого вида частиц.

Методика определения гидравлической крупности w описанная выше представляется вполне реализуемой в производственных условиях, не требующей специального оборудования и подготовки персонала для проведения опыта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гиргидов, А.Д. Механика жидкости и газа (гидравлика) [Текст] / А.Д. Гиргидов.— СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2002.— С. 355–356.
2. Гиргидов, А.Д. Турбулентная диффузия с конечной скоростью. [Текст] / А.Д. Гиргидов //.— СПб.: СПбГТУ, 1996.— С. 118–121.
3. Михалев, М.А. Физическое моделирование гидравлических явлений [Текст] / М.А. Михалев.— СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— С. 109–111.
4. Пирумов, А.И. Обеспыливание воздуха [Текст] / А. И. Пирумов— М.: Стройиздат, 1981.— С. 31–32.
5. Шиляев, М.И. Методы расчета и принципы компоновки пылеулавливающего оборудования [Текст] / М.И. Шиляев.— Томск: Изд-во ТГАСУ, 1999.— С. 11–24.
6. Штокман, Е.А. Очистка воздуха [Текст] / Е.А. Штокман.— М.: Изд-во АСВ, 1998.— С. 62–64.
7. Zhongchao Tan Mechanism of particle separation in aerodynamic air cleaning [Текст]: for the degree of PhD / Zhongchao Tan.— Urbana, Illinois.— 2004.— P. 14.

УДК 336.33

О.В. Романченко

ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ

Геодезическое обеспечение не является самостоятельным видом или этапом работ при ремонте и реконструкции, а лишь сопровождает ремонтно-строительные работы. Оно не влечет изменения количества этапов и стадий, но составляет важнейшую часть всего метрического обеспечения ремонта, реконструкции, эксплуатационного мониторинга, прогнозирования состояния на основе постоянного контроля пространственных параметров и динамики сооружений.

Измерение параметров, определяющих форму, размеры и пространственное положение всех элементов зданий и сооружений, производится согласно требованиям действующих ГОСТов и СНиПов. Виды инженерно-геодезических работ, определяемые в соответствии с действующими технологиями и нормативными документами, приведены в таблице. Они включают в себя следующие этапы с учетом особенностей объектов, условий их ремонта и реконструкции:

1. Обследование объектов ремонта и реконструкции, включающее топографическое обследование территории, зданий и сооружений, съемку подземных и надземных коммуникаций, уточнение генерального плана объекта. При этом выполняют: съемку каркасов здания и привязку к ним мест размещения машин и оборудования; определение вертикальности стен и колонн, прогибов конструкций, главных балок мостовых кранов; определение геометрических параметров подкрановых путей, нестворности и вертикальности колонн, отметок опорных плоскостей консолей; измерение крена дымовых труб и других сооружений башенного типа, осадок, смещений и деформаций сооружений.

Важное место в изучении состояния объектов занимает также определение тепловых характеристик, которое в обязательном порядке производят после ремонта и реконструкции.

Состав геодезических работ при ремонте и реконструкции

Подготовительный период ремонта и реконструкции	Основной период ремонта и реконструкции	Окончание ремонта и реконструкции
<p>А. Обследование объектов ремонта и реконструкции:</p> <p>А1. Топографическое обследование территории объекта здания, сооружения, подземных коммуникаций.</p> <p>А2. Корректирование и уточнение существующего генерального плана.</p> <p>А3. Съемка каркасов здания, определение вертикальности, прогибов, нестворностей, крена и т. д.</p>	<p>В. Геодезические работы при ремонте и реконструкции:</p> <p>В1. Построение (восстановление) геодезических сетей.</p> <p>В2. Разбивочные работы (основные и детальные).</p> <p>В3. Геодезическое обеспечение и контроль строительно-монтажных и ремонтных работ</p>	<p>Д. Геодезические работы при эксплуатации восстановленных и реконструированных объектов (мониторинг объектов):</p> <p>Д1. Разработка методов и определение периодов и измерений сдвигов, осадок и деформаций.</p> <p>Д2. Разработка и создание специальных плановых и высотных геодезических сетей.</p> <p>Д3. Измерение величин горизонтальных и вертикальных перемещений, крена, перекося</p>

Окончание табл.

Подготовительный период ремонта и реконструкции	Основной период ремонта и реконструкции	Окончание ремонта и реконструкции
<p>Б. Проектирование объектов ремонта и реконструкции:</p> <p>Б1. Разработка проекта геодезической плановой и высотной основы.</p> <p>Б2. Создание и закрепление на участке геодезической плановой и высотной основы (в том числе и основных частей зданий и сооружений).</p> <p>Б3. Приемка технической проектной документации и геодезической основы (плановой и высотной), необходимых для выполнения комплекса геодезических работ в последующие периоды ремонта и реконструкции</p>	<p>Г. Исполнительные съемки заканчиваемых объектов или отдельных их частей.</p> <p>Исполнительные съемки и геодезическая документация ремонтно-строительного производства</p>	<p>Е. Геодезические работы при сдаче законченных объектов (либо их частей) или выполненных этапов и стадий работ заказчику.</p> <p>Составление отчета о выполненных основных работах и подготовка комплекса геодезической документации на реконструируемые здания и сооружения, предъявление его рабочей и государственной комиссиям</p>

Основой требований к метрическому обеспечению ремонта и реконструкции служат регламентирующие новое строительство нормативные документы, адаптируемые к объектам, подлежащим ремонту и реконструкции.

2. Проектирование ремонта и реконструкции зданий и сооружений. В соответствии с техническим заданием проекта производства геодезических работ определяют: масштаб и высоту сечения топографической съемки, систему координат и высот; требования к качеству созданных геодезических сетей; перечень объектов и элементов, подлежащих координированию, обмеру, и требования к полноте съемки инженерных коммуникаций, железных и автомобильных дорог; перечень специальных материалов и представления материалов для проектирования, очередность выполнения работ.

3. Исполнительные съемки при ремонте и реконструкции зданий и сооружений делятся на две части: 1) для создания топографиче-

ского плана территории согласно нормативным требованиям СНиПов; 2) специальные исполнительные съемки для получения дополнительных данных и характеристик по сооружениям на всей территории реконструкции или на отдельных ее участках.

Вначале производится топографическая съемка в масштабах 1:500 или 1:1000 с обязательным обследованием и нивелированием подземных коммуникаций для составления исполнительного плана и разработки рабочей документации по реконструкции.

Второй вид съемки производится в масштабах 1:200 или 1:100 по специальной методике с повышенной точностью определения взаимного положения существующих объектов. При этом обязательны определение размеров сооружений, уклонов отмотки, съемка колодцев, опор, стоек, надземных и воздушных коммуникаций, составление эскизов присоединений и проездов. Съемка тоннелей и подземных ком-



муникаций включает составление плана и профиля железных и автомобильных дорог.

При ремонте и реконструкции сложных объектов производят нивелирование этажей, галерей, эстакад и их элементов с составлением планов и профилей.

Точность текущих исполнительных съемок должна быть не ниже точности разбивочных работ. Средняя квадратическая погрешность m контрольных измерений должна быть не более 0,2 величины допускаемого отклонения Δ контролируемого параметра, т. е. $m \leq 0,2\Delta$.

Точность окончательной исполнительной съемки должна обеспечивать графическую точность исполнительного плана соответствующего масштаба (5 см — 1:500; 10 см — 1:1000; 20 см — 1:2000).

4. Обеспечение эксплуатации восстановленных и реконструированных зданий и сооружений предполагает определение осадок, смещений, крена и деформаций всех несущих элементов.

Требования к точности измерения при исследованиях инженерных сооружений на моделях устанавливаются опытным путем. Считается, что допустимы следующие ошибки определения деформаций:

для стержневых систем $\pm 2,5 \%$;

для пластин $\pm 5 \%$;

для объемного напряженного состояния $\pm 8-15 \%$;

для оболочек $\pm 10-20 \%$.

Точность измерений при испытаниях железобетонных конструкций принимается равной 5 % от ожидаемого прогиба при нормативной нагрузке [3].

Погрешность определения объемов котлованов, сыпучих материалов и других объектов устанавливается в пределах 1–5 %.

Требования к геодезическому мониторингу вытекают из задач, условий эксплуатации и особенностей объекта и реализуются аналогично изучению его состояния при проектировании ремонта и реконструкции.

Существующая технология строительного производства [1] предусматривает выполнение следующих геодезических работ:

организацию разбивочной основы (внешняя и внутренняя разбивочные сети);

обеспечение разбивочных работ в процессе возведения объектов;

исполнительные съемки;

создание геодезической основы для наблюдения за положением объекта в процессе эксплуатации.

Геодезические работы с учетом особенностей производства ремонта и реконструкции включают:

топографо-геодезическое обследование объектов ремонта и реконструкции (топографические съемки, обмеры, исследование состояния);

организацию разбивочной основы;

обеспечение разбивочных работ в процессе ремонта и реконструкции;

исполнительные съемки;

геодезический мониторинг в процессе эксплуатации.

Различные требования к решению перечисленных геодезических работ определяют различные методы, средства и технологии развития геодезической основы при ремонте и реконструкции. В то же время многократное создание геодезических сетей для различных целей технологически громоздко и весьма дорого.

При ремонте и реконструкции рассматривают три основных варианта обеспечения требований к точности измерений: использование существующих (стандартных) геодезических сетей; адаптацию существующих сетей и их сгущение; создание новых строительных сетей.

Государственные геодезические сети (плано-вые и высотные) являются исходными для решения многочисленных задач и рассчитаны на определение больших пространственных параметров, поэтому не всегда могут быть использованы при определении с высокой точностью малых величин, тем более что значительное удаление пунктов от объектов требует дополнительных затрат на передачу геодезической информации, полученной посредством измерений, к объекту и снижает ее точность.

По этой причине используют две возможности:

выполнение геодезических измерений путем максимального сохранения точности при сгущении государственной геодезической сети;

создание локальных геодезических сетей на объекте с повышенной внутренней точностью.

Основными показателями, характеризующими надежность геодезической основы на всех этапах производства измерений, служат достаточная

плотность и точность геодезических пунктов, долговременная сохранность центров и простота их использования. В каждом конкретном случае обеспечение достаточной плотности пунктов опорной геодезической основы на участке реконструкции должно производиться при условии оптимальности в сочетании с конкретными условиями ситуации и рельефа местности.

Устанавливается следующая плотность съемочного обоснования и пунктов опорной геодезической сети на 1 км² незастроенных территорий:

- не менее 4 — для съемки в масштабе 1:5000;
- не менее 12 — для съемки в масштабе 1:2000;
- не менее 16 — для съемки в масштабе 1:1000;
- для съемки в масштабе 1:500 — устанавливается программой работ.

Для застроенных территорий количество точек устанавливается рекогносцировкой в зависимости от характера местности и типа застройки, но с условием выполнения точности измерений.

Предельные погрешности положения пунктов государственной геодезической сети и сетей сгущения не должны превышать на застроенной территории и открытой местности 0,2 мм в масштабе плана и 0,3 мм для закрытой местности.

Установлено, что современное состояние геодезического обеспечения застроенных территорий не отвечает требованиям интенсивного развития городского хозяйства по полноте и точности.

Существующие программы построения плановой геодезической основы крупномасштабных съемок застроенных территорий рассчитаны на производство разовых съемок и реализуются по одной и той же технологии, содержащей три основные последовательные стадии:

государственные геодезические сети 1–4 классов (ГГС);

геодезические сети сгущения 1 и 2 разрядов (ГСС);

геодезическое съемочное обоснование (ГСО).

Государственные сети геодезического планового обоснования, дополняемые сетями сгущения (полигонометрией и триангуляцией 1 и 2 разрядов), являются геодезической основой съемочных (в масштабах 1:5000 — 1:500) и разбивочных работ.

При расчетах точности инженерно-геодезических сетей различают два основных варианта использования сетей в зависимости от уровня требований к точности геодезических работ:

в первом варианте точность разбивочной основы и точность съемочного обоснования приблизительно одинаковы; опорная геодезическая сеть развивается по принципу от общего к частному с использованием сетей старших классов и разрядов в качестве исходной основы с жесткой привязкой к их сторонам и пунктам сетей младших классов;

во втором варианте точность разбивочных работ существенно выше точности съемочного обоснования, а создаваемые специальные опорные геодезические сети и пункты старших классов используются только для передачи ориентирования на одну из сторон сети и координат — на один из пунктов этой сети.

Очевидно, что порядок развития сетей при ремонте и реконструкции крупных объектов требует нестандартного подхода к организации геодезических работ и расчетам точности; он основан на максимальном использовании материалов ранее выполненных геодезических работ при обязательном соблюдении нормативных требований в сложных условиях застроенных территорий и особенностей конструкций существующих объектов.

При существующей практике в застроенных районах топографические съемки в масштабах 1:500–1:1000 одной и той же территории выполняются многократно, и при каждом повторении топографической съемки заново развивается временное съемочное обоснование. Именно поэтому для любой территории на весь период существования города необходимо наличие неизменных по точности опорных геодезических сетей с надежным обеспечением сохранности центров. Для этого необходимо создать систему геодезического обеспечения застроенной территории, наиболее полно учитывающую их динамику, для чего необходимы две фазы: создание геодезической сети для разового использования и сохранение ее неопределенно долгое время.

Разработаны три основных способа развития постоянного съемочного обоснования (ПСО): геодезический (редукционно-полярный) наземный, аэрофотогеодезический и спутниковый. В условиях современных городов применение последнего достаточно сложно из-за энергетических помех, но возможны сочетания этих способов.

Нормативная точность пунктов ПСО в соответствии с техническими и экономическими



расчетами характеризуется средней квадратической абсолютной погрешностью координат 7–8,5 см, которая включает погрешность «неопределенности» элемента капитального сооружения.

Затраты, необходимые для создания ПСО, компенсируются экономией, получаемой в результате исключения расходов на ежегодное восстановление сетей сгущения и создание временного съемочного обоснования при последующих съемках текущих изменений. Расчеты, выполненные с учетом этих условий показывают, что затраты на создание ПСО при плотности 3,5 пунктов на 1 га окупятся за 3–3,5 года. Таким образом, постоянное съемочное обоснование следует рассматривать как систему мероприятий организационного и технического характера, направленных на создание и сохранение на застроенных территориях точного и надежного геодезического обоснования для производства крупномасштабных съемок и всех видов массовых инженерно-геодезических работ.

Широко применяемые в последнее время способы и средства определения координат и высот наземных пунктов с помощью искусственных спутников Земли с точностью порядка 10 мм (системы спутникового позиционирования) также требуют наличия исходных геодезических пунктов, хотя и значительно меньшей плотности.

В соответствии с современными требованиями нормативных документов на территориях городов специальные сети не создаются, а главной геодезической основой служат государственные геодезические сети, построенные по единому перспективному плану. При развитии плановых сетей на территориях городов длины сторон триангуляции уменьшаются в полтора–два раза с условием сохранения плотности — один пункт на 5–15 км².

Вид и конфигурация геодезических плановых сетей зависят от размеров и формы территории города. В городах, вытянутых вдоль реки или линии железной дороги, триангуляцию 2 и 3 классов проектируют в виде одинарной или сдвоенной цепи треугольников. В городах компактной формы основной фигурой триангуляционных построений является центральная система, усиленная целесообразно выбранными направлениями диагоналей. Такие конструкции сетей — типовые.

На больших территориях плановая сеть может состоять из нескольких центральных сис-

тем. В дальнейшем для геодезического обоснования городской территории сети триангуляции 2 и 3 классов дополняются пунктами триангуляции 3, 4 классов и триангуляциями 1 и 2 разряда, входящими в системы треугольников, или используются дополнительные вставки отдельных пунктов.

Широко применяется на территориях городов полигонометрия 4 класса, 1 и 2 разрядов. При сгущении сетей полигонометрические ходы прокладывают по проездам, а закрепление полигонометрических пунктов на стенах зданий позволяет существенно повысить сохранность геодезических знаков.

Геодезическое обоснование в виде трилатерации не нашло широкого применения, что объясняется рядом причин.

Во-первых, в треугольнике трилатерации с тремя измеренными сторонами нет дополнительных измерений, вследствие чего в нем не организуются условные уравнения. Отсюда треугольник трилатерации по своим свойствам равноценен линейной засечке, не имеющей контроля полевых измерений.

Во-вторых, сети трилатерации не всегда обеспечивают надежное ориентирование их сторон, что приводит к значительным поперечным сдвигам пунктов и вызывает снижение точности сети в целом.

В-третьих, большое число измеряемых с помощью светодальномеров расстояний в условиях города сдерживается в ряде случаев неблагоприятными условиями измерений, к которым относятся существенные колебания температуры, давления и влажности, насыщенность территории города линиями электропередачи высокого напряжения и др.

В то же время сети трилатерации с короткими сторонами находят широкое применение при разбивочных работах сложных объектов и сооружений.

В результате анализа существующей геодезической основы можно сделать следующие выводы:

1. Государственные геодезические сети, являясь основой сетей сгущения низших классов, не могут быть использованы без изменения стандартных схем построения.

2. Условия застроенных территорий, энергетическая насыщенность, малые объемы геодези-

ческих работ и пространственный дискомфорт при ремонте и реконструкции не позволяют широко применять геодезические методы с электронными космическими средствами измерения.

3. Необходимы нестандартные методы, помехоустойчивые и недорогие мобильные средства, обеспечивающие оперативное создание локальных опорных сетей без нарушения технологии ремонта и реконструкции.

Таким образом, геодезическое сопровождение строительных проектов имеет нормативную базу, характеризующую требования к составу и

точности выполняемых работ, но в них практически отсутствуют рекомендации относительно организации производства работ, состава используемого оборудования, определения минимально необходимого числа измерений, обеспечивающих заданную точность.

Применяемые при производстве геодезических работ технологии представляют собой ограниченное счетное множество, что предполагает возможность постановки задач дискретной оптимизации (экстремальных задач комбинаторного типа).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Интулов, И.П.** Инженерная геодезия в строительном производстве [Текст] / И.П. Интулов; Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т.— Воронеж, 2004. — 329 с.
2. **Кини, Р.Л.** Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения [Текст] /

Р.Л. Кини, Х. Райфа.— М.: Радио и связь, 1981. — 560 с.

3. **Клейнер, Г.Б.** Производственные функции: теория, методы, применение [Текст] / Г.Б. Клейнер.— М.: Финансы и статистика, 1986.— 238 с.

УДК 624.073.2

Т.Р. Тедеев, А.Л. Рутковский

О ЦЕЛЕСООБРАЗНОМ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИИ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Известно [1, 2], что прогноз развития напряжений и деформаций в зданиях и инженерных сооружениях требует разработки методов решения контактной задачи взаимодействия сооружения с основанием. При этом дискретное моделирование основания методом конечных элементов (МКЭ) приводит к тому, что перемещения вычисляются в конечном числе узловых точек, а между ними подчиняются заданному интерполяционному закону [3–5]. С учетом этих условий наиболее удобен для решения контактной задачи классический метод [2] Б.Н. Жемочкина — А.П. Синицына (МЖС). Он полностью совместим с дискретными методами расчета оснований и позволяет сравнительно простым путем получать решения многих задач промышленного, гражданского и гидротехнического строительства.

Изложим основные положения этого метода применительно к расчетной схеме взаимодействия конструкции конечной длины с основа-

нием (рис. 1, а). Функция распределения контактных напряжений основания $P(x)$ в случае воздействия силовых и влажностных нагрузок будет иметь, в общем случае, криволинейный вид (рис. 1, б). Так как основание представлено совокупностью конечных элементов, то можно рассматривать взаимодействие конструкции с основанием в конечном числе контактных точек при интерполяционном представлении функции распределения контактных напряжений $P(x)$ в межузловых интервалах.

В классической постановке принимается кусочно-постоянная аппроксимация функции распределения контактных усилий $P(x)$, упрощающая построение эпюр силовых факторов. В нашей работе использовано как кусочно-постоянное, так и полиномиальное представление функции распределения контактных напряжений.

В соответствии с общими положениями МЖС для расчета статически неопределимой системы,

приведенной на рис. 1, б, выберем смешанный метод. Основная система будет иметь вид, указанный на рис. 1, в. Используя принцип суперпозиции нагрузок, решение задачи можно разбить на два этапа. На первом этапе определяются составляющие вектора контактных усилий — \bar{X}_p , соответствующих квазистатической задаче

$$[\delta] \bar{X}_p + \bar{\Delta}_p = 0, \quad (1)$$

где $[\delta]$ — симметричная матрица единичных коэффициентов смешанного метода; \bar{X}_p — вектор

контактных напряжений; $\bar{\Delta}_p$ — вектор грузовых членов от внешней силовой нагрузки. Методика вычисления элементов симметричной матрицы $[\delta]$ и вектора грузовых членов $\bar{\Delta}_p$ приведена в работе [2].

Наиболее сложный вопрос в этой методике расчета — определение перемещений контактной поверхности основания. Если для обычных линейно-деформируемых сред эти перемещения могут быть найдены на основе решения Фламана [2], то для структурно-неустойчивых основа-

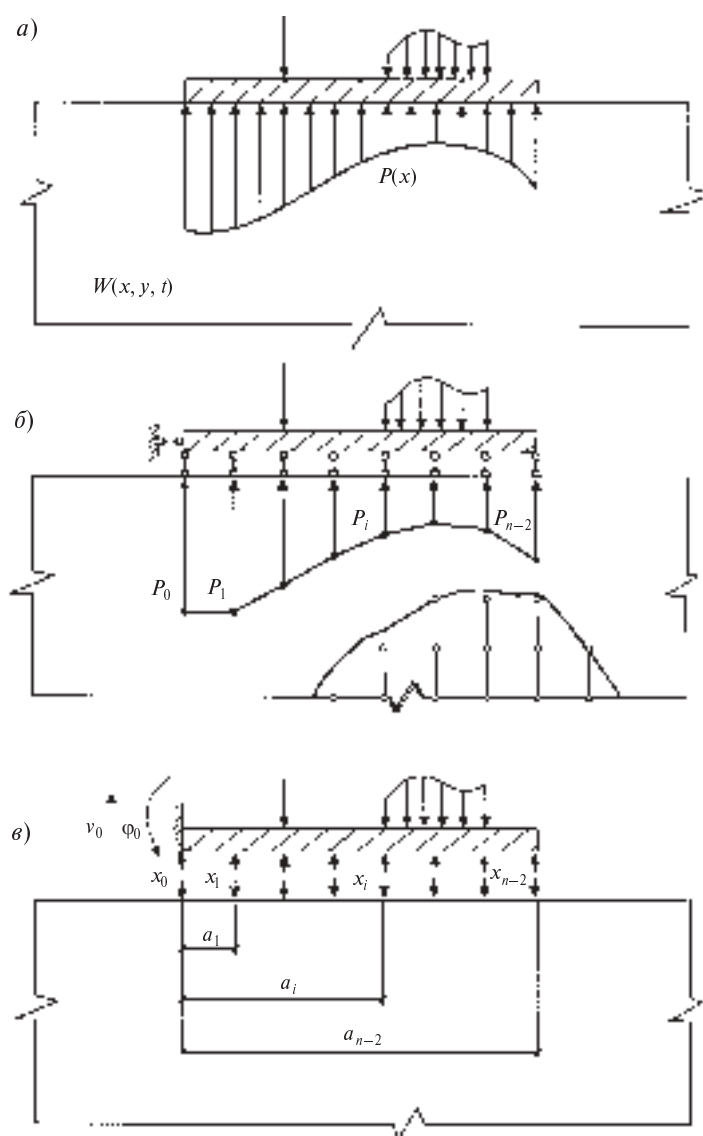


Рис. 1. Дискретизация контактной задачи по методу Б.Н. Жемочкина — А.П. Синицына:
 а — исходная схема; б — моделирование функции распределения контактных напряжений; в — основная система МЖС

ний они должны определяться из решения задачи МКЭ. При этом легко учитываются (в отличие от классической трактовки МЖС) произвольная конфигурация основания, его неоднородность и геологическое сложение.

На втором этапе расчета из решения дополнительной системы уравнений

$$[\sigma] \bar{X}_W + \bar{\Delta}_W = 0, \quad (2)$$

где $\bar{\Delta}_W$ — вектор перемещений контактных узлов основания от геомеханических процессов набухания или просадки, определяются составляющие вектора контактных напряжений основания \bar{X}_W .

Элементы вектора перемещений контактных узлов $\bar{\Delta}_W$ определяются из решения МКЭ общей задачи теории влагоупругости структурно-неустойчивых оснований [6].

При этом в случае плоской деформации физические уравнения влагоупругости имеют следующий вид:

$$\bar{\sigma} = E(W)[D](\bar{\varepsilon} + \bar{\varepsilon}_0), \quad (3)$$

где $\bar{\sigma} = \{\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}\}^T$ — вектор напряжений; $[D]$ — матрица приведенных коэффициентов Лямэ;

$\bar{\varepsilon} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}\}^T$ — вектор деформаций, $\bar{\varepsilon}_0$ — вектор влажностных деформаций, определяемый из следующей зависимости:

$$\bar{\varepsilon}_0 = (1 + \nu) \psi(W) \begin{Bmatrix} \beta_x(\sigma_{0x}) \\ \beta_y(\sigma_{0y}) \\ 0 \end{Bmatrix} = (1 + \nu) \psi(W) \bar{\beta}(\bar{\sigma}_0); \quad (4)$$

ν — коэффициент Пуассона; $\psi(W)$ — функция влажности (приращение влажности по сравнению с начальной); $\beta(\sigma_0)$ — вектор коэффициентов набухания или просадки; T — знак транспонирования.

Экстремальная постановка задачи отыскания поля перемещений \bar{u} в плоскодеформированном основании следующая: для заданного распределения поля влажности $W(x, y, t)$ [7] найти соответствующий моменту времени t вектор перемещений $\bar{u}(x, y)$, определенный и непрерывный в замкнутой области F вместе со своими

производными, удовлетворяющий на границе S области кинематическим граничным условиям и сообщающий минимальное значение полной потенциальной энергии деформации

$$J(\bar{u}) = \iint_F \{ E(W) ([A] \bar{u})^T \times \\ \times [D] (0,5 [A] \bar{u} - \varepsilon_0) - \bar{u}^T \bar{\rho} \} dF - \sum_{i=1}^I P_i \delta_i. \quad (5)$$

Здесь $\bar{\rho}$ — вектор массовых сил; P_i — сосредоточенные силы; δ_i — перемещение точек приложения этих сил; I — число сил; $[A]$ — матрица дифференциальных операций уравнений равновесия теории упругости [8].

Пусть заданная область F представлена совокупностью M конечных элементов. Примем, что в пределах одного элемента (индекс «э») справедливы соотношения

$$\bar{u}(x, y) = [N] \bar{\delta}_\varepsilon, \quad (6)$$

где $[N]$ — матрица функций формы элемента, $\bar{\delta}_\varepsilon$ — вектор перемещений узлов элемента. Подставляя (6) в выражение (5) и минимизируя для одного элемента, получаем:

$$[K]_\varepsilon \bar{\delta}_\varepsilon + \bar{R}_{\rho\varepsilon} + \bar{R}_{\varepsilon_0\varepsilon} - \bar{P}_\varepsilon = 0, \quad (7)$$

где

$$[K]_\varepsilon = \iint_{F_\varepsilon} E(W) ([A][N])^T [D] ([A][N]) dxdy; \quad (8)$$

$$\bar{R}_{\varepsilon_0\varepsilon} = - \iint_{F_\varepsilon} E(W) ([A][N])^T [D] \bar{\beta}(\bar{\sigma}_0) \psi(W) dxdy; \quad (9)$$

$$\bar{R}_{\rho\varepsilon} = - \iint_{F_\varepsilon} [N]^T \bar{\rho} dxdy. \quad (10)$$

Для всей области после суммирования вкладов отдельных элементов имеем

$$[K] \bar{\delta} + \bar{R}_\rho + \bar{R}_{\varepsilon_0} - \bar{P} = 0. \quad (11)$$

После удовлетворения граничным условиям из этой системы линейных алгебраических уравнений определяется итоговый вектор узловых перемещений $\bar{\delta}$, включающий и перемещения контактных узлов согласно системе (2).

Окончательный вектор реактивных усилий определяется как сумма составляющих в расчетные моменты времени:

$$\bar{X} = \bar{X}_p + \bar{X}_W. \quad (12)$$

На основе известного вектора \bar{X} могут быть вычислены коэффициенты полиномов, аппроксимирующих контактное давление $P(x)$, и построены эпюры основных силовых факторов.

Общий алгоритм расчета конструкций на структурно-неустойчивом основании в соответствии с изложенной методикой включает в себя следующие основные этапы:

1. На базе решения нелинейной задачи влагопроводности при неполном водонасыщении определяется влажностный режим основания в расчетные моменты времени.

2. Производят статический расчет заданной конструкции и ее основания и определяют вектор \bar{X}_p .

3. Рассчитывают основание с учетом приложенных к нему статических нагрузок и вектора \bar{X}_p . Определяют активную зону геомеханических процессов набухания или просадки [6].

4. Выполняют расчет структурно-неустойчивого основания с учетом статических нагрузок и расчетного поля влажности, определяют перемещения контактных узлов поверхности основания.

5. Производят расчет заданной конструкции с учетом известных перемещений основания. Из решения системы уравнений (2) определяют дополнительный вектор реакций основания

\bar{X}_w . После суммирования с использованием зависимости (12) получают окончательный вектор \bar{X} , с помощью которого вычисляют составляющие функции распределения контактных давлений основания $P(x)$, и строят эпюры силовых факторов. При необходимости осуществляется переход к следующему расчетному моменту времени.

На основе разработанной методики была решена модельная задача определения напряженно-деформированного состояния расчетной конструкции на слое основания без учета геомеханических процессов набухания или просадки (частный случай влагоупругого основания), но при локальном уплотнении контактной поверхности ударным способом. Для получения горизонтальной контактной поверхности локальное уплотнение заполняют жестким материалом, например бетоном [9]. В целом размеры расчетной области 8×20 м, поперечные размеры расчетной полосы 1×6 м. Расчетная конструкция нагружена распределенной нагрузкой 100 кН/м^2 . Характеристики плиты: $E = 30000 \text{ МПа}$; $\nu = 0,2$; $\rho = 2400 \text{ кг/м}^3$. Расчетные показатели упругого основания: $E = 30 \text{ МПа}$; $\nu = 0,36$; $\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$.

Результаты решения задачи, представленные на рис. 2, в связи с симметрией для части расчет-

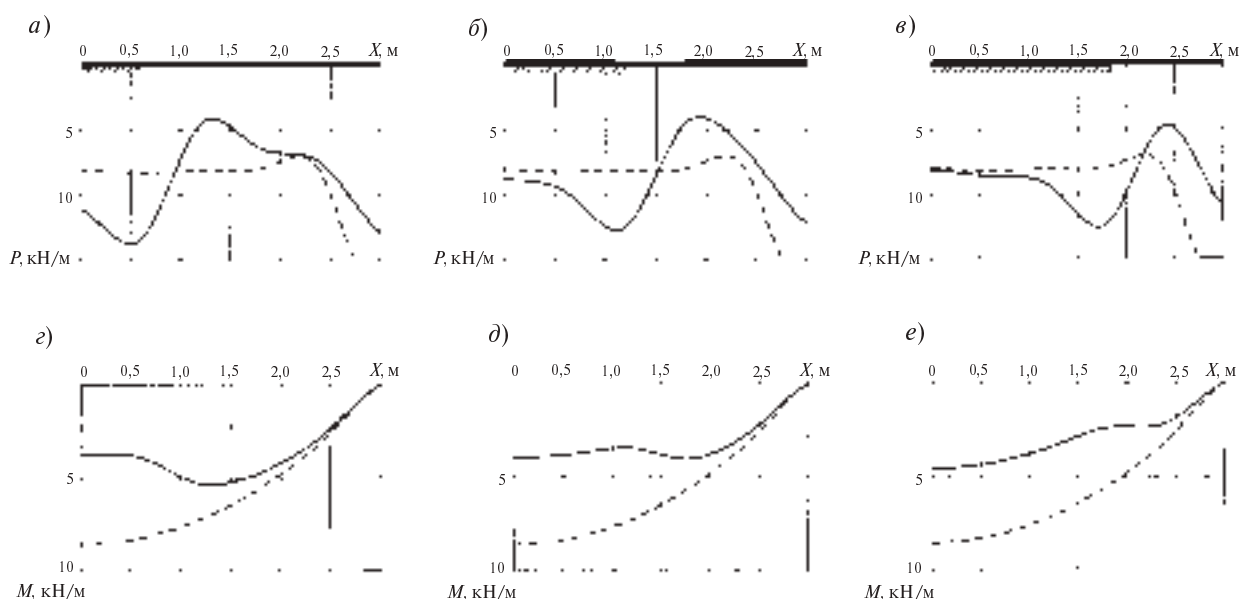


Рис. 2. Расчет конструкции при $L = 6$ м с учетом локально уплотненного массива:
а, б, в — функция распределения контактных напряжений; г, д, е — изгибающие моменты;
— — с учетом локального уплотнения; - - - без учета локального уплотнения

ной области показывают, что наличие локально уплотненного массива качественно и количественно меняет картину распределения контактных напряжений в основании. Существенно увеличиваются значения контактных напряжений

в центральной части, а их концентрация под консольной частью резко (в 2 раза) уменьшается. Значительно уменьшаются изгибающие моменты в расчетных сечениях рассмотренной конструкции (в 1,8–2 раза).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горбунов-Посадов, М.И.** Расчет конструкций на упругом основании [Текст] / М.И. Горбунов-Посадов, Т.А. Маликова, В.И. Соломин.— 3-е изд.— М.: Стройиздат, 1986.— 679 с.,ил.
2. **Жемочкин, Б.Н.** Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании [Текст] / Б.Н. Жемочкин, А.П. Сеницын.— М.: Госстройиздат, 1962.— 240 с.
3. **Норри, Д.** Введение в метод конечных элементов [Текст] / Д. Норри, Ж. Фриз.— М.: Мир, 1981.— 304 с.
4. **Зенкевич, О.** Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред: пер. с англ. [Текст] / О. Зенкевич, И. Чанг.— М.: Недра, 1974.— 240 с.
5. **Зенкевич, О.** Конечные элементы и аппроксимация [Текст] / О. Зенкевич, К. Морган.— М.: Мир, 1981.— 318 с.
6. **Тер-Мартirosян, З.Г.** Прогноз механических процессов в массивах многофазных грунтов [Текст] / З.Г. Тер-Мартirosян.— М.: Недра, 1986.— 292 с.
7. **Тедеев, Т.Р.** Методология и алгоритмы расчета полей влажности в задачах проектирования грунтовых сооружений [Текст] / Т.Р. Тедеев, Г.Г. Арунянц.— Владикавказ: Терек, 2005.— 203 с.
8. **Александров, А.В.** Основы теории упругости и пластичности [Текст] / А.В. Александров, В.Д. Потапов.— М.: Высшая школа, 1990.— 400 с.
9. **Сорочан, Е.А.** Фундаменты промышленных зданий [Текст] / Е.А. Сорочан.— М.: Стройиздат, 1986.— 303 с.

УДК 614

А.А. Сыров, А.В. Храмов

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЙ

Современная тенденция обеспечения безопасности человека и окружающей среды основана на оценке риска от техногенной деятельности и природных явлений и снижения его до приемлемых значений. Принятый в конце 2002 года федеральный закон «О техническом регулировании», вызвавший большое возмущение в системах обеспечения безопасности общества, ввел понятие «степень риска», от значения которого зависят те или иные действия производственных сторон. В области использования атомной энергии это понятие применяется для характеристики обеспечения безопасности человека во всех условиях воздействия на него ионизирующего излучения искусственного или природного происхождения.

Согласно требованиям [1] для обеспечения радиационной безопасности при нормальной эксплуатации источников излучения необходимо руководствоваться основными принципами, в числе которых:

- непревышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников излучения (принцип нормирования);

- запрещение всех видов деятельности с использованием источников излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда, причиненного дополнительным облучением (принцип обоснования);

- поддержание на возможно низком и достижимом уровне (с учетом экономических и социальных факторов) индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника излучения (принцип оптимизации).

Эти положения актуальны и для судостроительной отрасли, так как опасность увеличива-

ется при наличии на заводе судов с атомной энергетической установкой и уменьшается при их отсутствии. Радиационная опасность может оцениваться по общепринятой шкале INES и должна соответствовать требованиям ОСПОРБ-99. На рисунке представлено соответствие категорий аварий по ОСПОРБ (помечены кружками) шкале INES.

Как видно из рисунка, шкала INES предлагает более детальную градацию инцидентов, учитывая влияние вредных последствий как на персонал, так и на население и окружающую среду.

Основа для оценки действующей системы обеспечения радиационной безопасности в организациях и в каждом регионе — следующие показатели, предусмотренные федеральным законом «О радиационной безопасности населения»:

- характеристика радиоактивного загрязнения окружающей среды;

- анализ обеспечения мероприятий по радиационной безопасности и выполнения норм, правил и гигиенических нормативов в области радиационной безопасности;

- вероятность радиационных аварий и их масштаб;

- степень готовности к эффективной ликвидации радиационных аварий и их последствий;

- анализ доз облучения, получаемых отдельными группами населения от всех источников ионизирующего излучения;

- число лиц, подвергшихся облучению выше установленных пределов доз облучения.

Управление риском составляет основу обеспечения безопасности. Оно осуществляется посредством разработки и реализации мер нормативного регулирования, технических и организационных решений, снижающих вредные

Шкала INES			
КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ			
	последствия вне зоны события	последствия в зоне события	деградация защиты в глубине
7	ТЯЖЕЛАЯ АВАРИЯ	Сильнейший выброс: тяжелые последствия для здоровья населения и окружающей среды	
6	СЕРЬЕЗНАЯ АВАРИЯ	Значительный выброс: требуется полномасштабное применение плановых мероприятий по восстановлению	
5	АВАРИЯ С РИСКОМ ДЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ВНЕ ЗОНЫ СОБЫТИЯ	Страничный выброс: требуется частичное применение плановых мероприятий по восстановлению	Тяжелое повреждение активной зоны и физических барьеров
4	АВАРИЯ БЕЗ ЗНАЧИТЕЛЬНОГО РИСКА ДЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ВНЕ ЗОНЫ СОБЫТИЯ	Минимальный выброс: облучение населения в пределах допустимого	Серьезное повреждение активной зоны и физических барьеров; облучение персонала с летальным исходом
3	СЕРЬЕЗНЫЙ ИНЦИДЕНТ	Превышение допустимого выброса: облучение населения ниже допустимого предела	Серьезное распространение радиоактивности; облучение персонала с серьезными последствиями
2	ИНЦИДЕНТ		Значительное распространение радиоактивности; облучение персонала за пределами допустимого
1	АНОМАЛЬНАЯ СИТУАЦИЯ		Инцидент с серьезными отказами в средствах безопасности
0	СОБЫТИЯ С ОТКЛОНЕНИЕМ НИЖЕ ШКАЛЫ	ОТСУТСТВУЕТ ЗНАЧИМОСТЬ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ	
СОБЫТИЯ ВНЕ ШКАЛЫ		НЕТ СВЯЗИ СО ШКАЛОЙ СОБЫТИЙ	

Рис. 1. Соответствие категорий аварий по ОСПОРБ-99 шкале INES

воздействия на персонал и население от технологических процессов и возможных аварий, производственных неполадок и инцидентов. Для управления риском необходимо иметь такие их количественные характеристики, которые могут быть оценены на основе реально имеющейся на предприятии информации и величина которых адекватно изменяется в зависимости от вида и объемов реализации компенсирующих мероприятий.

Основные задачи оценки и управления риском на судостроительных и судоремонтных предприятиях Минпромторга России заключаются в представлении специалистам, принимающим соответствующие управленческие решения:

объективной информации о состоянии безопасности объектов и технологических процессов; информации о вредном воздействии на персонал и население объектов и технологических процессов;

сведений о наиболее опасных элементах объектов и этапах технологических процессов; обоснованных рекомендаций по уменьшению риска.

Оценка риска должна производиться на всех этапах жизненного цикла объекта: при проектировании объекта (разработка технологического процесса); строительстве и вводе в эксплуатацию; при эксплуатации (для объектов и техно-



логических процессов обращения с ОЯТ и РАО); в случае ремонта, модернизации; при выводе из эксплуатации, утилизации.

В целом оценка радиационного риска предполагает следующее:

анализ исходных данных;

собственно оценку радиационного риска, включающую в себя расчет вероятности возможных аварий и оценку последствий аварий;

управление риском.

При анализе исходных данных необходимо сделать следующее:

1. Подготовить систему исходной информации об объекте и прилегающей территории, сформированную на основе специфических данных об объекте, данных объектов-аналогов и литературных источников.

2. Выявить и описать факторы радиационного риска, для этого:

выполнить описание технологических процессов;

получить данные о радионуклидном составе источников ионизирующего излучения, находящихся на объекте.

3. Составить перечни, во-первых, источников радиационных выбросов при нормальном режиме выполнения технологических процессов на объекте, во-вторых, возможных ядерных и радиационных аварий, для чего необходимо:

выявить технологические процессы и отдельные этапы при нормальном режиме выполнения работ на объекте, при которых происходят радиационные выбросы и/или сбросы;

выявить технологические процессы и отдельные операции, нарушение которых может привести к ядерной или радиационной аварии;

составить перечень оборудования, отказ которого может привести к ядерной или радиационной аварии;

составить перечень ошибок персонала, которые могут привести к ядерной или радиационной аварии.

Результатом анализа исходных данных должны быть:

перечень источников радиационных выбросов и/или сбросов при нормальных режимах выполнения технологических процессов на объекте;

перечень ядерных и радиационных аварий, возможных на объекте;

описание источников опасности, факторов риска, объектов и процессов;

описание условий возникновения и развития исходных событий, способных привести к ядерной или радиационной аварии;

описание сценариев возникновения и развития аварий;

предварительные оценки опасности и риска.

Расчет вероятности аварий производится на основе методик вероятностной оценки безопасности (ВАБ), статистических данных, показателей надежности работы оборудования, экспертных оценок путем учета мнения специалистов в данной области.

При оценке риска нормальной эксплуатации объектов вероятность выброса (сброса) радиоактивных веществ принимается равной 1.

Оценка последствий включает расчет возможных дозовых воздействий на персонал, население и окружающую природную среду. Для оценки последствий необходимо оценить физические эффекты нежелательных событий. При анализе последствий аварий используются модели аварийных процессов. При этом применяются комплексы расчетных методов, которые по своему назначению могут быть разделены на четыре группы. Состав групп и связи между отдельными методами расчета были разработаны и представлены в работе [2].

Первая группа содержит методы расчета, позволяющие определить состояние аварийного объекта в зависимости от типа аварии и сценария ее протекания.

Вторая группа базируется на методах расчета, дающих возможность оценивать накопление радионуклидов — продуктов деления в активной зоне и ее элементах (для случаев облученного ядерного топлива, находящегося в хранилище) с учетом работы ядерной энергетической установки на разных уровнях мощности и времени, прошедшего после остановки реактора, а также образование радионуклидов при нейтронной вспышке в случае самопроизвольной цепной реакции (СЦР).

Третья группа включает методы расчета, позволяющие прогнозировать перенос активности по помещениям объекта и за его пределами (в атмосфере и в морской среде) на основе данных о характере изменения давления в защитной оболочке ЯЭУ и ряда теплофизических параметров в отсеках (помещениях) с учетом информации об уровне герметичности или степени повреждения защитных барьеров, а также внутрикорпусных и корпусных конструкций объекта.

К четвертой группе относятся методы расчета следующего:

дозы проникающего излучения в помещениях опасных объектов;

доз внешнего и внутреннего облучения персонала в помещениях, смежных с аварийным, при утечке радионуклидов и их переносе по помещениям;

радиационного воздействия на персонал и население, обусловленного радиоактивным загрязнением объектов окружающей среды (воздуха, поверхности почвы, морской воды).

Исходные данные, используемые в комплексе методов по определению параметров радиационного воздействия на персонал, население и окружающую среду при авариях, в свою очередь можно разделить на две группы. К первой относится информация, составляющая основу банка ядерно-физических данных о радионуклидах, вклад которых учитывается при моделировании радиационных последствий аварий. Вторую группу составляет информация, относящаяся к конкретному проекту и принятому сценарию развития аварии.

При указанных выше предположениях была проведена оценка динамики изменения параметров пятна радиоактивного загрязнения акватории Кольского залива, а также мощности дозы гамма-излучения на высоте 1 м над центром пятна при затоплении судна атомно-технологического обслуживания (судно АТО) [3, 4]. При проведении расчетов считалось, что пятно загрязнения акватории существует до тех пор, пока отношение средней концентрации в пятне к граничной превышает 1.

Результаты расчетов показывают следующее: время от момента сброса до момента снижения концентрации в центре пятна до допустимой удельной активности $ДУА_{\text{нас}}$ — менее 7 суток;

максимальные размеры пятна загрязнения достигаются через 58,2 часа после сброса;

максимальный диаметр пятна загрязнения меньше ширины залива, которая составляет от 1,5 км до 3,5 км;

максимальная мощность дозы гамма-излучения не превышает 10^{-4} мкЗв/с (36 мкбэр/час);

в случае, если судно будет дрейфовать в центре пятна загрязнения в течение всего времени существования последнего (7 суток), доза внешнего облучения экипажа не превысит 3 мкЗв (300 мкбэр).

Согласно требованиям [1] для наиболее полной оценки вреда, который может быть нанесен здоровью в результате облучения в малых дозах, определяется ущерб, количественно учитывающий как эффекты облучения отдельных органов и тканей тела, радиочувствительные к ионизирующему излучению, так и всего организма в целом. В соответствии с принятой в мировой практике линейной беспороговой теорией зависимости риска стохастических эффектов от дозы величина риска пропорциональна дозе излучения и связана с ней через линейные коэффициенты радиационного риска.

Рассмотрение результатов расчетной оценки радиоактивного загрязнения акватории Кольского залива позволяет сделать определенные выводы, а именно:

мгновенный сброс высокоактивных жидких радиоактивных отходов (ЖРО) из цистерн контурных и дезактивационных вод судна АТО не представляет заметной экологической или радиационной опасности ввиду небольших размеров и малого времени существования пятна загрязнения акватории;

повышение доз внешнего облучения населения прибрежных районов, персонала баз и предприятий и экипажей кораблей и судов, находящихся в заливе, в результате мгновенного сброса высокоактивных ЖРО из цистерн контурных и дезактивационных вод судна АТО будет незначительным. Даже пребывание в центре пятна загрязнения в течение всего времени его существования приведет к получению дозы внешнего облучения, не превышающей 30 % от предельной дозы для населения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [Текст] // Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 7 июля 2009 года № 47.

2. Кудинович, И.В. Моделирование аварийных процессов в судовых ядерных энергетических установках [Текст] / И.В. Кудинович, Н.Л. Кучин, В.П. Струев. — СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного университета, 1998.



3. Ганул, М.Н. Радиационные последствия затопления судов атомно-технологического обслуживания [Текст] / М.Н. Ганул, Н.Л. Кучин, И.В. Сергеев // Атомная энергия.— 1998. Т. 85, Вып. 3.

4. Ганул, М.Н. Моделирование источника загрязнения морской воды при затоплении судна, содержащего радиоактивные материалы [Текст] / М.Н. Ганул, Н.Л. Кучин, И.В. Сергеев // Атомная энергия. — 2005.— Т. 98. № 1.— С. 61–71.

УДК 614

В.И. Гуменюк, А.В. Храмов

ПРОБЛЕМЫ УЧЕТА ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ТРАНСПОРТНЫХ УСТАНОВОК

В нашей стране в 1995 году был принят Федеральный закон «Об использовании атомной энергии», который позволил упорядочить как деятельность с ядерными материалами (ЯМ), радиоактивными веществами и радиоактивными отходами (РВ и РАО), так и отношения, возникающие в процессе этой деятельности. Положения, изложенные в законе, составляют основу для безопасного обращения и нераспространения ЯМ, РВ и РАО в Российской Федерации.

Федеральный закон определяет полномочия в области использования атомной энергии Президента Российской Федерации (статья 7), Федерального Собрания Российской Федерации (статья 8), Правительства Российской Федерации (статья 9), органов государственной власти субъектов Российской Федерации (статья 11), в вопросах совместного ведения — органов государственной власти Российской Федерации и субъектов Российской Федерации (статья 10), органов местного самоуправления (статья 12).

Наряду с этим Федеральный закон определяет права организаций, в том числе общественных организаций (объединений), и граждан в области использования атомной энергии: на получение информации (статья 13) и формирование политики (статья 14) в этой области; на возмещение убытков и вреда, причиненных радиационным воздействием (статья 15); на социально-экономические компенсации для работников объектов использования атомной энергии (статья 16).

Статья 2 ФЗ «Об использовании атомной энергии» провозглашает в качестве основного принцип правового регулирования отношений в области использования атомной энергии обеспе-

чение безопасности. Тем самым законодательно устанавливается приоритетность безопасности.

Таким образом, федеральный закон в разных формах осуществляет правовое регулирование ядерной деятельности. В частности, некоторые виды деятельности вменяются как обязательные, в том числе учет и контроль ЯМ, РВ и РАО.

Статьей 22 ФЗ «Об использовании атомной энергии» определено, что в Российской Федерации должны существовать две государственные системы учета и контроля: одна для ядерных материалов, другая для радиоактивных веществ и радиоактивных отходов. В основу обеих систем, имеющих дело с ЯМ и РВ, положен признанный международным сообществом принцип измеряемого и контролируемого баланса материалов. При этом значительный интерес представляют учет и контроль отработанного ядерного топлива (ОЯТ), входящего в состав облученных тепловыделяющих сборок (ОТВС) транспортных реакторных установок.

Государственный учет и контроль ЯМ осуществляется с целью:

определения наличного количества ЯМ в пунктах (местах) их нахождения, хранения и захоронения;

предотвращения потерь, хищений и несанкционированного использования ЯМ;

представления в установленном порядке органам государственной власти, государственного управления использованием атомной энергии, государственного регулирования безопасности при использовании атомной энергии, охраны окружающей среды соответствующей информации о наличии и перемещении ЯМ;

информационного обеспечения органов исполнительной власти (федеральных и субъектов федераций) для принятия управленческих решений по обращению с ЯМ в интересах радиационной безопасности населения и защиты окружающей среды.

Следует отметить, что в настоящее время учет ОЯТ осуществляется одновременно в обеих системах государственного учета и контроля. При этом системе государственного учета и контроля ядерных материалов (СГУК ЯМ) ОЯТ учитывается как ЯМ, а в системе государственного учета и контроля РВ и РАО (СГУК РВ и РАО) — как РАО.

Между тем цели функционирования обеих систем, фиксированные в статье 22 Закона, полностью совпадают; объектами для обеих систем являются физические объекты; учетной единицей для обеих систем служит «поддающийся идентификации предмет», содержащий учетный материал, «целостность которого остается неизменной в течение определенного периода времени»; учетные данные для обеих систем — это характеристики материала, «используемые в учетных документах». Учитываемое наличное количество материала для обеих систем есть «измеренное или иначе определенное в соответствии с установленными процедурами количество материала, фактически имеющееся в данное время»; физические принципы систем измерений для обеих систем также одинаковы.

Поэтому можно указать на проблему перевода ЯМ в РАО. Ростехнадзором разработан нормативный документ НП-072-06, определяющий эту процедуру. Документ не прописывает конкретные процедуры и механизмы перевода ЯМ в РАО, за исключением краткого описания работы комиссии, которая должна осуществлять данный перевод. Таким образом, из одной системы должен уйти ЯМ, а в другой системе должны образоваться РАО. При сбое в работе какой-либо системы может произойти утрата радиоактивного или ядерного материала в документации либо реально.

Данная проблема хорошо видна на примере учета ОЯТ транспортных реакторных установок.

Внедрение ядерной энергетики в отечественное военное кораблестроение и гражданское судостроение сопровождалось разработкой сложной, разветвленной и специфической инфраструктуры, охватившей базирование и техническое обеспечение атомного флота.

Всего в нашей стране было построено 10 гражданских судов с ядерными энергетическими установками (ЯЭУ) различных проектов [1]. При этом чрезвычайное внимание на всех этапах развития атомного флота уделялось вопросам безопасного обращения с ОЯТ и РАО.

В 1960 году в составе Мурманского морского пароходства для технического и технологического обслуживания и ремонта судов с ЯЭУ и судов атомно-технологического обслуживания, а также для постоянного базирования последних было создано ремонтно-технологическое предприятие «Атомфлот», вошедшее затем в состав ФГУП «Атомфлот».

Кроме обычного судоремонта предприятие выполняло также перезарядку реакторов, ремонт реакторного оборудования, прием, временное хранение и переработку твердых и жидких радиационных отходов (ТРО и ЖРО), а также временное хранение и транспортировку свежего топлива и ОЯТ. ОТВС временно хранится в ФГУП «Атомфлот» на специальной контейнерной площадке и на плавучих технических базах (ПТБ) «Имандра» и «Лота», откуда производится регулярная отгрузка ОЯТ на ПО «Маяк».

В соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 28 мая 1998 года № 518 «О мерах по ускорению утилизации атомных подводных лодок и надводных кораблей с ядерными энергетическими установками, выведенных из состава ВМФ, и экологической реабилитации радиационно-опасных объектов Военно-морского флота» все береговые технические базы (БТБ) ВМФ в 2000 году были переданы Минатому России (в настоящее время Госкорпорация «Росатом»).

БТБ были созданы для проведения перезарядки активных зон реакторов атомных подводных лодок (АПЛ), хранения свежего топлива и ОЯТ, перегрузки фильтров активности первого и третьего контуров, дезактивации средств индивидуальной защиты, хранения и переработки РАО.

Основные принципиальные подходы и решения по проблемам, возникающим при обращении с радиационно-опасным оборудованием, ОЯТ и РАО, определены «Концепцией комплексной утилизации АПЛ и НК с ЯЭУ», разработанной в 2001 году Минатомом России и согласованной со всеми заинтересованными ведомствами. Концепция предусматривает выгрузку ОЯТ из реакторов кораблей с ЯЭУ и хранилищ береговых



и плавучих технических баз, вывоз ОЯТ из регионов на переработку, «отсроченную» утилизацию реакторных отсеков с радиационно-опасным оборудованием реакторных установок, а также меры по обеспечению ядерной, радиационной и экологической безопасности.

В связи с предстоящей ликвидацией БТБ ВМФ и последующей реабилитацией их территорий наибольший интерес представляют проблемы учета и контроля ядерных материалов в хранилищах БТБ в губе Андреева, хотя эти проблемы могут возникнуть и при ликвидации других береговых хранилищ ОЯТ.

Решение вопросов учета и контроля ядерных материалов необходимо, так как по имеющимся данным в хранилищах БТБ губы Андреева находится более 20000 ОТВС [1], [2]. Там хранятся ОЯТ АПЛ 1-го и 2-го поколений и ОЯТ ледокола «Ленин» [2]. Все учетные данные (тип зоны, номер ОТВС, энерговыработка, точное местонахождение — номер чехла, номер ячейки и т. д.) должны храниться как в самой губе Андреева, так и в Техническом управлении Северного флота. К сожалению, из-за давности лет многие данные находятся в архивах и их достаточно сложно разыскать. Кроме того, причиной отсутствия достоверных учетных данных является авария в губе Андреева в 1983 году, при ликвидации которой не проводился необходимый учет и контроль расположения чехлов с ОТВС, и, таким образом, в настоящее время достаточно сложно определить, какие сборки и где находятся [3].

В результате принятых экстренных мер по предотвращению развития аварийной ситуации часть чехлов с ОТВС была вывезена для переработки на ПО «Маяк». Остальные чехлы с ОТВС были размещены в трех ранее не используемых заглубленных емкостях цилиндрической формы комплекса спецводоочистки. В настоящее время хранилище ОЯТ состоит из трех блоков сухого хранения ОЯТ — БСХ № 1 (сооружение 3А), БСХ № 2 (сооружение 2А) и БСХ № 2 (сооружение 2Б) [4].

Конструктивно эти сооружения выполнены в виде заглубленных монолитных железобетонных емкостей объемом по 1000 м³ каждая. Одна из емкостей (сооружение 2А) облицована углеродистой сталью.

Для хранения чехлов с ОТВС в емкостях вертикально установлены металлические трубы диаметром 250 и 300 мм и высотой около 5 м из уг-

леродистой стали марки Ст 20. При этом в отступление от проектной документации шаг решетки размещения труб колеблется в широких пределах, что не позволяет для извлечения чехлов с ОТВС использовать существующие технологии с применением поворотных защитных плит.

ОТВС размещены в чехлах разных типов, причем в каждом чехле максимально размещаются по 7 ОТВС. Хранилище рассчитано на размещение 3611 чехлов с ОТВС, при этом проектная вместимость емкостей составляет: БСХ № 1 — 1200 ячеек; БСХ № 2 — 1220 ячеек; БСХ № 3 — 1191 ячеек под чехлы с ОТВС и 30 ячеек под поглощающие нейтроны стержни системы управления и защиты реактора.

К настоящему времени практически все емкости хранилища загружены полностью.

К основным конструктивным недостаткам хранилищ ОТВС относятся [4]:

отсутствие герметичности баков хранения ОЯТ, что может привести к поступлению грунтовых вод в ячейки хранилища и выходу радионуклидов в окружающую среду;

негерметичность и некачественное исполнение кровли и перекрытий над баками, не обеспечивающих защиту ячеек от атмосферных осадков.

Возможность управления процессом хранения и контроля состояния ОЯТ в таких условиях, а следовательно, и обеспечение ядерной и радиационной безопасности представляют сложную техническую проблему. ОЯТ хранятся в чехлах (сначала в бассейнах здания 5, а потом в БСХ) от 25 до 40 лет. Сегодня практически невозможно точно установить, сколько еще осталось времени до разрушения трубной части чехлов и тепловыделяющих элементов ОТВС, а также появления просыпей топливной композиции.

Именно в таких условиях учет и контроль ядерных материалов является одной из приоритетных задач. В первую очередь подобное знание необходимо для процесса транспортировки, так как согласно действующим требованиям ядерной безопасности в ТУК необходимо загружать чехлы с ОТВС одной активной зоны, обогащение которых одинаково. Во-вторых, на ПО «Маяк» ОТВС не будут сразу переданы в переработку, следовательно, чехлы с ОТВС должны будут какое-то время храниться. Вполне вероятно, что из-за большого количества ОТВС срок хранения может быть достаточно долгим.

Сразу возникает вопрос, как наладить учет и контроль ядерных материалов при отсутствии учетных документов. Один путь — это считывание типа активной зоны и номера каждой ОТВС и сопоставление их с данными завода-изготовителя активной зоны, что означает перегрузку каждой сборки независимо от ее состояния.

При этом в определенной мере будут соблюдаться требования СГУК ЯМ. Для полного соблюдения требований, изложенных в НП-030-05 «Основные правила учета и контроля ядерных материалов», необходимо провести расчеты по изменению радионуклидного состава ядерного топлива.

Второй путь — считывание только типа активной зоны, что позволит для целей учета и контроля ядерных материалов производить лишь подъем на небольшую высоту одной сборки, а далее осуществлять все операции только с чехлом, в котором находятся ОТВС. По типу активной зоны будут определены первоначальное обогащение ядерного топлива по урану-235 и вес ОТВС.

В этом случае целесообразно осуществить перевод ЯМ в РАО и производить учет в СГУК РВ и РАО.

Каждый из выбранных путей имеет свои достоинства и недостатки, которые требуют значительной проработки. Однако при разработке технологии обращения с ОТВС следует учитывать основные требования радиационной безопасности, установленные Нормами радиационной безопасности [5], а именно — непревышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения персонала и населения от источников излучения. Для персонала, который будет проводить работы в губе Андреева, нормируется величина эффективной дозы облучения (20 мЗв в год в среднем за любые 5 лет, но не более 50 мЗв в год).

Исходя из требований НРБ-99/2009 более предпочтительна технология выгрузки ОТВС непосредственно в чехлах.

К этому решению подталкивает и то обстоятельство, что при длительном хранении ОТВС в условиях, о которых говорилось выше, появляются различные дефекты: нарушение герметичности оболочек топливных элементов; разбухание оболочек ОТВС; коррозия узлов крепления ОТВС в хранилище и, как следствие, возникновение эффекта «холодной сварки»; механиче-

ские разрушения и изменения положений ОТВС относительно опорных гнезд.

При разработке технологии обращения с ОЯТ к дефектным чехлам и ОТВС относят [4] те, которые имеют: существенные отклонения от штатной геометрической формы и размеров; повреждения и затрудняют загрузку ОТВС в чехол и выгрузку ее из чехла; повреждения захватной части (головки) чехла ОТВС; нарушения конструктивной целостности (значительная негерметичность, обрывы, обрезки, оплавления и т. д.).

До настоящего времени отсутствуют полные и достоверные картограммы, отражающие точное месторасположение, характер заклинивания и количество дефектных чехлов с ОТВС на БТБ не только в губе Андреева, но и в других регионах. С учетом изложенной ситуации на БТБ следует при разработке технологии обращения с ОЯТ в качестве консервативной оценки считать, что все находящееся в БСХ топливо — дефектно.

Учитывая требования НРБ-99/2009, возможные дефекты ОТВС, включая их частичное разрушение [3], рассмотрим возможную технологию выгрузки чехлов. Она должна включать следующие операции:

- проектирование и создание буферного хранилища для накопления (формирования) партии чехлов с ОТВС, входящими в состав одной активной зоны;

- правку деформированных пазов байонетных соединений подвески трубной части чехлов и проверку свободного выхода пробки чехла из его верхнего кожуха;

- подъем одной ОТВС из чехла на высоту, достаточную для считывания типа активной зоны (маркировка производится на заводе-изготовителе на хвостовике ОТВС), и дальнейшую постановку ОТВС на место;

- подрыв чехла и выемку его из гнезда;

- перезагрузку (выгрузку) подготовленных к вывозу чехлов с ОТВС из хранилища в ячейку буферного хранилища.

После определения типа активной зоны формируется учетный документ, в котором указывается тип активной зоны, первоначальное обогащение ОТВС по урану-235, количество ОТВС в чехле (возможно, что не в каждом чехле находится по 7 ОТВС). Как уже указывалось, в губе Андреева в основном хранятся выгруженные ак-



тивные зоны АПЛ 1-го поколения, для которых известна средняя энерговыработка и, следовательно, можно оценить накопление радионуклидов. Величину средней энерговыработки также следует указать в создаваемом учетном документе, что позволит более правильно организовать дальнейшее хранение чехлов с ОТВС на ПО «Маяк» и последующую переработку ОЯТ.

Дальнейшая транспортировка ОЯТ возможна как на ФГУП «Атомфлот» для временного хранения и загрузки в специальные вагон-контейнеры [4], так и непосредственно на ПО «Маяк» морским путем [6].

Подведем итог изложенному в статье.

Ввиду отсутствия учетных документов на ЯМ, находящиеся в хранилищах губы Андреева, необходимо в целях учета и контроля ядерных материалов разработать технологию определения характеристик ОТВС. Подобной характеристикой может быть тип активной зоны, что позволяет определить первоначальное обогащение ядерных материалов по урану-235.

Предлагается в целях соблюдения требований радиационной безопасности производить выгрузку и дальнейшую транспортировку ОТВС непосредственно в чехлах, в которых они находятся.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов, В.М. Российская и мировая атомная энергетика [Текст] / В.М. Кузнецов, Х.Д. Чеченов. // М.: Изд-во Московского гуманитарного университета, 2008.

2. Сивинцев, Ю.В. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию [Текст] / Ю.В. Сивинцев [и др.].— М.: Изд-во АТ, 2005.

3. Сафонов, А. Ядерная губа Андреева [Текст] / А. Сафонов, А. Никитин.— Издание журнала «Экология и право».— СПб.: , 2009.

4. Лямин, П.Л. Особенности обращения с дефектным отработавшим ядерным топливом в хранилищах облученных тепловыделяющих сборок

в губе Андреева [Текст] / П.Л. Лямин [и др.] // Вестник судостроения.— СПб. 2010. № 17.

5. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09 [Текст].— Утвер. постанов. Главного гос. сан. врача Российской Федерации от 07.07.2009.— № 47.

6. Петухов, В.В. Проблемы транспортирования облученного ядерного топлива транспортных реакторов [Текст] / В.В. Петухов, В.Г. Мурамович, Ю.Л. Бордученко.— Тем. сб. Росатома «Ядерная и радиационная безопасность России».— М., Вып. 6.— С. 185.

УДК 614

А.Ю. Туманов, В.В. Домаков, В.Г. Кондратьев

ТЕХНОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ И ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Исследования зарубежных специалистов характера развития природных и основных техногенных воздействий в чрезвычайных ситуациях мирного времени, при применении ядерного оружия или оружия массового поражения в вооруженных конфликтах, а также при проведении террористических актов показали, что в этих экстремальных ситуациях энергетические народнохозяйственные объекты (ЭНХО) и аппарат управления ими — наиболее уязвимые элементы, поскольку с ними связана жизнедеятельность всего общества [1].

Природные катаклизмы могут быть вызваны падением астероидов на Землю, подвижкой тектонических плит, что вызывает цунами, бури и смерчи, наводнениями рек, которые каждый год становятся неожиданностью для государства и общества, селями, пожарами, наконец, человеческим фактором и т. п. Они поражают и энергетические народнохозяйственные объекты, и обслуживающий их персонал, и население.

Такого же уровня последствия для энергетических народнохозяйственных объектов, обслуживающего их персонала и населения могут воз-

никнуть при применении оружия в вооруженных конфликтах и при проведении террористических актов.

В широком смысле под оружием понимают общее название устройств и средств, применяемых для уничтожения живой силы противника, его военной техники, различных инженерных сооружений и населения. В этом плане оружие подразделяют:

1) по характеру (масштаб) поражающего действия на оружие массового поражения (ОМП — ядерное, химическое и биологическое) и обычное оружие;

2) по характеру решаемых задач — на стратегическое, оперативно-тактическое, тактическое.

В узком смысле под оружием понимают совокупность боеприпасов и боевых приборов, которые собственно и продуцируют поражающие факторы (ПФ) при их боевом применении. При такой трактовке оружие входит обязательным элементом в комплекс вооружения, который в свою очередь представляет собой совокупность образцов боевой техники, функционально связанных и совместно используемых для решения боевых задач.

Помимо качественных признаков предпринимаются попытки разработать и количественные признаки классификации оружия. К их числу относят:

количество людей, которые могут быть уничтожены одним комплексом вооружения (N_y);

вероятность защиты от действия данного комплекса вооружения (P_3);

коэффициент усиления человека оружием (K_y); она равен отношению количества людей, которые могут быть уничтожены (выведены из строя) одним комплексом вооружения, к количеству людей, обеспечивающих применение этого комплекса.

Тогда в качестве обобщенного количественного критерия, характеризующего эффективность оружия, может выступать удельная мощность поражающего действия

$$\bar{\gamma} = \frac{N_y D_{\max} P_{\Pi} (1 - P_3)}{M_{\text{БК}} t_d (0,1 + t_{\Pi})}, \quad (1)$$

где D_{\max} — максимальная дальность действия, км; P — вероятность попадания в цель с учетом надежности и точности средств доставки; $M_{\text{БК}}$ — масса комплекса вооружения, кг; t_d — время до-

ставки оружия к цели, час; t_{Π} — время от момента срабатывания инициирующего устройства до наступления эффекта поражения, час.

Отсюда следует, что поражение различных ЭНХО, обслуживающего их персонала и населения, т. е. нарушение их нормального функционирования на срок не менее заданного, происходит в результате применения оружия (в том числе и природы), которое продуцирует различные ПФ, воздействующие на окружающую среду. Под ПФ любого оружия следует понимать материальную субстанцию окружающей среды, изменившую свои свойства в результате применения оружия или проявления природных катаклизмов и оказывающую поражающее действие на объекты и людей [2].

Изменение различных свойств окружающей среды достигается тремя принципиально различными способами: изменением свойств самой среды; внесением в среду другой материальной субстанции; использованием их комбинации.

Первый способ, связанный с изменением свойств самой среды, имеет место при применении ядерного оружия, в результате природных катаклизмов и проявляется в результате воздействия воздушной ударной волны, светового излучения, проникающей радиации, радиоактивного загрязнения (заражения) местности и др.

Материальной субстанцией воздушной ударной волны, воздействующей на ЭНХО, обслуживающий их персонал и население, служит воздух окружающей среды, который в результате воздействия изменяет в некоторой области свои свойства: плотность, температуру, скорость движения и т. д. Различные объекты, попадающие в эту область, могут получить поражение различной степени тяжести, причем, чем сильнее изменение свойств окружающей среды, тем больше шансов, что объекты получат поражение (повреждение) при прочих равных условиях.

Материальной субстанцией воздействия светового излучения является часть электромагнитного излучения в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной частях спектра, которая дополнительно появляется в окружающей среде после воздействия.

Наконец, материальная субстанция проникающей радиации и радиоактивно зараженной местности, которая воздействует при ядерных взрывах — это ионизирующие излучения (гамма и нейтронное). По месту и времени испуска-



ния их можно разделять на проникающую радиацию и радиоактивно загрязненную местность (РЗМ), при этом в результате взаимодействия ионизирующих излучений со средой или геомагнитным полем Земли образуются вторичные ПФ: область повышенной ионизации (ОПИ); электромагнитный импульс (ЭМИ); внутренний электромагнитный импульс (ВЭМИ).

Второй способ, связанный с внесением в среду другой материальной субстанции, имеет место, как правило, при применении химического и биологического оружия.

Рассматривая с аналогичных позиций химическое оружие, можно утверждать, что его основным ПФ служит отравляющее вещество (ОВ) в боевом состоянии, которое воздействует на обслуживающий ЭНХО персонал и население. Основными видами боевых состояний ОВ являются: пар и тонкодисперсный аэрозоль, грубодисперсный аэрозоль, аэровзвеси, а также ОВ на готовых поражающих элементах.

По аналогии с химическим оружием ПФ биологического оружия является биологическая рецептура в боевом состоянии, при этом основным видом боевого состояния биологической рецептуры служит тонкодисперсный аэрозоль. Вид боевого состояния ОВ биологической рецептуры определяет способ воздействия или попадания в организм живого существа. Так, для пара и тонкодисперсного аэрозоля наиболее характерно воздействие через органы дыхания, а в некоторых случаях и через слизистые оболочки глаз. Для грубодисперсного аэрозоля и аэровзвесей характерно проникание вещества в организм через кожные покровы. ОВ на готовых поражающих элементах в организм живых существ попадают через раневые поверхности. Биологические рецептуры, находящиеся в организме переносчика, так же как и ОВ на готовых поражающих элементах, попадают в организм человека через место укуса (трансмиссивный путь).

ПФ, продуцируемые природой, ОМП, авариями (разрушениями) энергетических народнохозяйственных объектов можно разделить на три большие группы:

1) физические; они включают осколки, образующиеся при взрыве боеприпасов, упругие волны, как звуковые, так и ударные (в том числе и воздушные), электромагнитное излучение ионизирующего и неионизирующего действия,

потоки заряженных и незаряженных частиц и другие физические ПФ;

2) химические; в их числе — отравляющие вещества, токсины, фитотоксиканты, сильно действующие ядовитые вещества, а также другие ПФ;

3) биологические, к которым относят патогенные микроорганизмы (бактерии, вирусы, риккетсии и грибки) и другие биологические ПФ.

Помимо этого возможно комбинированное воздействие перечисленных ПФ, а также появление неизвестных (нетрадиционных) ПФ.

В силу негативного воздействия природных и основных техногенных средств поражения энергетических народнохозяйственных объектов неизбежно встает задача сведения к минимуму возможного ущерба. Считается, что в таких ситуациях одно из важнейших требований к защите ЭНХО — их «защищенность», под которой понимали «способность каждого их элемента противостоять (сохранять нормальный уровень функционирования) внешним воздействиям за счет использования специальных средств и способов защиты». Из временного и пространственного представления систем управления ЭНХО вытекает возможность воздействия на входящие в их состав элементы за счет прицельного и неприцельного применения силами природного и техногенного характера, а также различными видами оружия с широким диапазоном параметров поражающих факторов. В случае природных, ядерных техногенных воздействий и применения ОМП, использующего новые физические принципы, возникает возможность одновременного воздействия многих поражающих факторов.

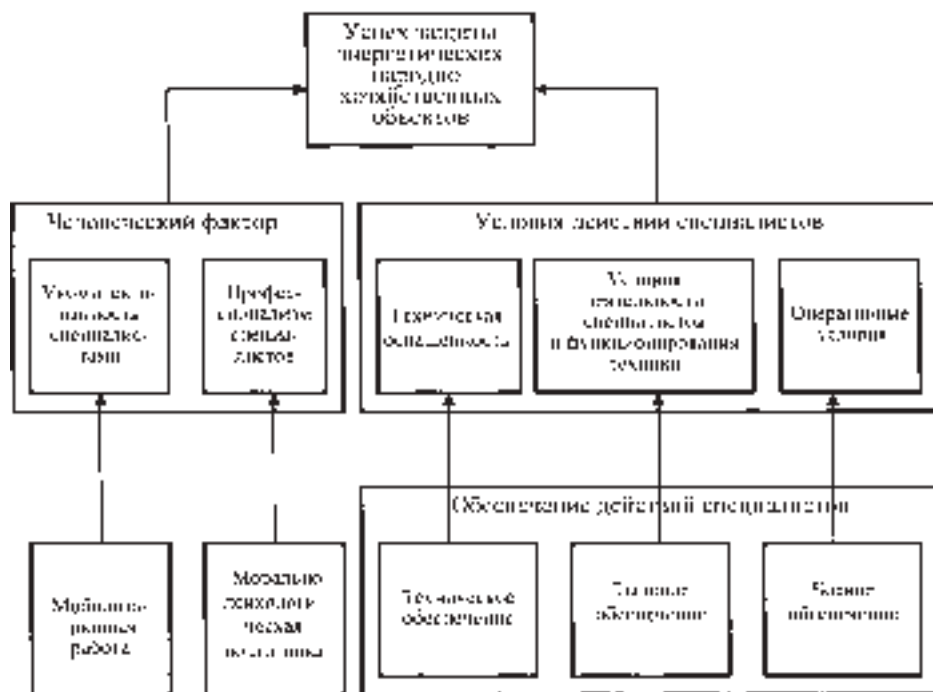
Успешность защиты ЭНХО сегодня определяется совокупностью факторов, представленных на рисунке.

Среди них обычно выделяют два фактора как определяющие качество защиты ЭНХО:

человеческий, зависящий как от самого специалиста, так и от условий его работы;

условия обеспечения защищенности, зависящие от технической оснащенности, функционирования техники и характера природного, техногенного и боевого воздействия.

Требуемого уровня человеческого фактора предполагается достигать в ходе работы, профессиональной и морально-психологической подготовки, а мероприятия, направленные на создание и поддержание на требуемом уровне условий ра-



Совокупность факторов, определяющих успешность защиты энергетических народнохозяйственных объектов

боты специалистов, связывают с обеспечением их действий; при этом различают три вида обеспечения: оперативное; материальное; техническое.

Считается, что все виды обеспечения защиты ЭНХО определяются соответствующим количеством элементов, их качеством и наличием необходимого для эксплуатации технического имущества.

После воздействия природных и основных техногенных средств и нанесения ущерба самое серьезное внимание уделяется определению потерь, восстановлению, разработке мер для предотвращения аналогичных воздействий и обеспечению их эксплуатации в будущем.

При ориентации на стабильную направленность социально-экономической сферы и с учетом изложенного можно обобщать требования к защите ЭНХО от воздействия природных и основных техногенных средств поражения.

Все ПФ изменяются как во времени, так и в пространстве, т. е. являются функциями координат точки (x, y, z) относительно источника поражающего фактора и времени t :

$$ПФ = ПФ(x, y, z, t), \quad (2)$$

Совокупность значений ПФ в пространстве на заданный момент времени может определять

поле ПФ. Для характеристики пространственного распределения величин ПФ в фиксированный момент времени было введено понятие эквискалярной поверхности, в каждой точке которой величина ПФ сохраняла свое постоянное значение:

$$ПФ(x, y, z, t) = c, \quad (1.3)$$

где c — постоянная для заданной эквискалярной поверхности при фиксированном времени t .

Эквискалярные поверхности различных величин ПФ носят названия: изобарических (давление), изотермических (температура), изодозных (доза) и т. п., а кривые пересечения эквискалярной поверхности с любой другой поверхностью (как правило, параллельной поверхности земли) называются изолиниями величины ПФ (например, применительно к дозе — изодоза, к давлению — изобара, к температуре — изотерма и т. д.) и используются для решения различных прикладных задач по определению масштабов заражения окружающей среды, построения координатных законов поражения и т. д.

Поля всех ПФ можно рассматривать с двух принципиально различных позиций: и как детерминированные, и как случайные. Детерминированное представление полей в силу его простоты используется достаточно широко, однако



в реально при продуцировании ПФ их поля случайны, что определяется нестабильностью функционирования ОМП и стохастическим характером метеорологических величин.

Пусть ущерб обслуживающему персоналу, населению, окружающей флоре и фауне, а также повреждение и разрушение технических средств (ТС), ЭНХО и различных инженерных сооружений наносится природными и основными техногенными средствами поражения, к числу которых относятся как мгновенно действующие ПФ (воздушная ударная волна, световое излучение, проникающая радиация, ЭМИ, первичное облако ОВ и биологические рецептуры), так и длительно действующие ПФ (ионизирующие излучения с радиоактивно загрязненной местности, вторичное облако боевого токсического химического вещества и т. п.). Это позволяет разделить их на изолированные, вызванные воздействием только одного поражающего фактора, и комбинированные, возникающие в результате воздействия двух и более различных по природе ПФ или одинаковых по природе ПФ.

По характеру и тяжести изолированные поражения делят на механические (воздушная ударная волна), термические (световое излучение ядерного взрыва, зажигательное оружие), радиационные (при воздействии ионизирующих излучений); химические (воздействие ОВ, сильнодействующего ядовитого вещества), биологические (воздействие биологических рецептур).

По характеру и тяжести комбинированные поражения связывают с их представлением в виде любой комбинации изолированных поражений или одного и того же ПФ, имеющего в зависимости от вида боевого состояния одну и ту же мишень [3].

По тяжести нарушения нормального функционирования ЭНХЛ выделяют следующие степени их поражения:

легкую, или первую, степень, определяемую временным снижением степени нормального функционирования объекта, восстановление которого может осуществляться силами специалистов, а для людей заканчивается благоприятным исходом;

среднюю, или вторую, степень, определяемую более длительной потерей возможности нормального функционирования объекта, восстановление которого может осуществляться с привлечением ремонтных подразделений,

а у людей — в госпиталях (при этом считаются возможными единичные смертельные исходы);

третью, или тяжелую, степень, связанную с безвозвратными потерями специалистов, разрушением объектов, требующих капитального ремонта;

крайне тяжелую, или четвертую, степень, характеризующую полным разрушением объекта, когда его восстановление считается не целесообразным, а также массовыми летальными исходами для специалистов в ранние сроки после воздействия ПФ.

При воздействии природных катаклизмов или ядерного оружия принято различать пораженных (под ними понимают специалистов, получивших поражения не ниже первой степени тяжести, а для ОВ — не ниже пороговых) и потери (людей и объекты, не способные к функционированию в течение заданного времени).

При применении биологического оружия понятие пораженные и потери по существу совпадают, так как и под потерями, и под пораженными понимают специалистов, у которых развивается специфическое заболевание, характерное для данного возбудителя.

При воздействии некоторых ПФ поражение людей развивается во времени, и пораженные специалисты только через некоторое время будут переходить в категорию потерь. А потому в качестве количественных характеристик ПФ рассматривают и их временные показатели: быстродействие; время потери способности к нормальному функционированию; время, по истечении которого пораженные люди становятся работоспособными.

Аналогичны рассуждения имеют место при радиационных, химических и биологических авариях на энергетических народнохозяйственных объектах, где кроме масштабов радиоактивного, химического или биологического загрязнения (загрязнения) окружающей среды оказываются весьма важными также и распределение пораженных по степеням тяжести.

Таким образом, диалектика мер и контрмер в условиях стабильной направленности социально-экономической сферы на теоретическом уровне приводит к постановке задачи расчета минимального возможного ущерба от действия известных поражающих факторов, что в конечном плане выливается в квалификацию различного рода ущербов и определение степени поражения ЭНХО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ермак, С.Н.** Военно-теоретический труд [Текст] / С.Н. Ермак / ВИКА.— 1996.— 433 с.
2. **Кармишин, А.М.** Теория поражающего действия ОМП [Текст] / А.М. Кармишин, М.В. Гагарин, О.П. Кравченко / ВАНЗ.— М., 1995.— 150 с.
3. **Чуев, Ю.В.** Прогнозирование в военном деле [Текст] / Ю.В. Чуев, Ю.Б. Михайлов.— М.: Воениздат, 1975.— 278 с.

УДК 614

Г.Л. Атоян, В.Г. Кондратьев

ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ ЗАЩИТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ АГРЕССИВНОЙ МЕНЯЮЩЕЙСЯ СРЕДЫ

В основе проектирования организационных структур аппарата управления (регулирования) энергетическими народнохозяйственными объектами (ЭНХО) для обеспечения их защиты всегда лежали определенные принципы. Под ними понимались «исходные положения, основополагающие идеи, от которых нельзя было отступить» [1] на данном временном интервале. Они формировались в некоторые совокупности или множества, отражающие потребности реализуемых методов защиты и закономерности развития ЭНХО, причем их свойства не рассматривались во взаимодействии, а сводились без остатка только к свойствам составляющих их элементов, т. е. были их простой суммой. Именно такие совокупности принципов и определяли аксиоматику организационного проектирования, характер которого полностью материализовался в используемой эвристической схеме.

Так, при реализации организационного проектирования независимых систем управления ЭНХО, или «сложных систем», исходили из совокупности принципов системного анализа [2], включающей:

принцип системности, который выражался в том, что с позиции целого, элементами которого были составляющие его объекты, это целое представляло собой новый объект;

принцип формирования эталонной модели, который базировался на абстрагировании от всех случайных и несущественных факторов, а защита энергетических народнохозяйственных объектов описывалась в «чистом виде»;

принцип разработки классификаторов-инвариантов, подразумевающий разделение объектов на такие группы, которые одновременно взаимно исключают друг друга и в то же время способны включать в себя еще не охваченные классификацией элементы;

принцип дифференциации и согласования «интересов» объектов, который исходит из факта различия «интересов» отдельных элементов и необходимости их согласования в рамках объекта более высокого уровня.

Следует отметить, что перечисленная совокупность принципов системного анализа носит чисто качественный характер и предоставляет лишь возможность синтеза организационной структуры аппарата управления, который должен был обеспечить защиту ЭНХО, но весьма приблизительно соответствовал гипотетически заданному эталонному варианту. Решение же иных вопросов, в том числе с использованием количественных оценок, на базе данной совокупности принципов становится весьма проблематичным и требует введения уже иной аксиоматики.

Практический опыт показал, что для установления надлежащих взаимосвязей, взаимозависимостей и согласованного взаимодействия составляющих систему управления ЭНХО технических средств, реализующих их защиту в условиях агрессивной меняющейся среды требования к принципам обеспечения такой защиты стали приобретать новое качество. Определение этих требований и сведение самих принципов



путем их классификационной компоновки в совокупность оказываются неперспективными: практика как критерий истины подтвердила это положение. Поэтому поиск решения естественным образом оказался связан с разработкой системы новых принципов обеспечения защиты энергетических народнохозяйственных объектов.

Понятие системы в различных отраслях науки использовалось, как правило, весьма широко и имело различные, хотя и близкие по смыслу толкования. Например, в общем случае понятие «система» рассматривалось как противоположное понятию «хаос», а для статики «система» определялась как «план, порядок расположения частей целого, предначертанное устройство, ход чего-либо в последовательном, связном порядке» [3] и была идентична понятию «структура». Сущностным свойством, отличающим систему от структуры, является представление о системе как о совокупности элементов, не только связанных в единое целое, но еще и взаимодействующих.

Следует подчеркнуть, что систем как таковых в природе не существует, а существуют явления, процессы, предметные области, объекты, которые могут рассматриваться как системы. Иначе говоря, система — это понятие, которое служит средством исследования сложных объектов в динамике, при этом в зависимости от точки зрения или от поставленной исследовательской задачи один и тот же объект может быть представлен как множество различных систем. Отсюда построение рациональной системы принципов приобретает исключительно важное значение.

Сама система может быть разделена на относительно самостоятельные части — элементы, которые выполняют определенную специфическую функцию и не подлежат дальнейшему разбиению, являются как бы неделимыми с точки зрения рассматриваемого процесса функционирования системы. Выделение элементов в системах опосредуется их разбивкой на подсистемы, представляющие собой относительно самостоятельные части системы, которые в свою очередь состоят из подсистем или элементов. Элементами могут быть различные явления, процессы, предметные области, объекты, в том числе и принципы обеспечения защиты ЭНХО.

Разделение объектов на элементы и системы относительно. Каждая система может быть представлена как элемент системы большего масштаба (надсистемы и суперсистемы), в свою оче-

редь, любой элемент можно рассматривать в качестве относительно самостоятельной системы, состоящей из элементов.

Функционирование совокупности элементов как целостных систем обеспечивается установлением и реализацией отношений между ними.

Взаимодействующие элементы зависят друг от друга, накладывают ограничения на поведение связанных с ними других элементов. Поэтому наличие зависимостей между элементами трактуется как отношение между ними.

Если поведение элементов в системе независимо, то связь между ними отсутствует, однако отношение между ними и здесь существует, но признается вырожденным.

Взаимодействие элементов системы порождает у нее такие свойства, которыми ни один элемент в отдельности, ни множество не взаимодействующих элементов не обладают. Отсюда следует, что система, в отличие от совокупности, объединения или множества, — это такой объект, свойства которого не сводятся без остатка к свойствам составляющих его элементов и не являются его суммой. Причина того, что свойство системы не равно сумме свойств составляющих ее элементов, заключается именно в их взаимодействии. Появление у целого свойств, не выводимых из наблюдаемых свойств частей, называется эмерджентностью. Соответственно целостные свойства систем, не сводимые без остатка к свойствам отдельных элементов, — это эмерджентные (неаддитивные) свойства. В некоторых системах эмерджентные свойства могут быть выведены на основе анализа отдельных элементов (эмерджентность 1-го рода), но в большинстве систем такие свойства вообще невыводимы и часто непредсказуемы (эмерджентность 2-го рода). Очевидно, что необходимость в подобном системном рассмотрении возникает именно тогда, когда выявляются эмерджентные свойства, не обнаруживаемые при поэлементном рассмотрении объекта.

Следовательно, система, в том числе и система принципов обеспечения защиты ЭНХО, — это совокупность взаимосвязанных в единое целое и взаимодействующих элементов и отношений между ними, которая обладает свойствами, отсутствующими у элементов и отношений, его образующих, либо у простой суммы этих элементов и отношений.

Агрессивная меняющаяся среда, прошлый опыт, а также возможности уже известных индигриентов требуют сделать ставку на следующие взаимосвязанные и взаимодействующие внутрисистемные принципы [4, 5], которые можно положить в основу обеспечения защиты ЭНХО.

Первый внутрисистемный принцип базируется на положении о том, что любая система, в том числе и система принципов обеспечения защиты ЭНХО, полностью определяется составляющими ее элементами и отношениями между ними. При этом одним из наиболее важных моментов служит утверждение, что только определенные совокупности элементов, определенным образом связанные и взаимодействующие между собой, образуют систему. В общем случае здесь возникает известная трудность: невозможно говорить об элементах вообще, если заранее не установлено, что они могут лечь в основу построения системы принципов обеспечения защиты энергетических народнохозяйственных объектов. Однако с полным правом можно утверждать, что система принципов обеспечения защиты ЭНХО не может включать себя сама как свой элемент.

Второй внутрисистемный принцип реализуется в «аксиоме объемности», которая определяется следующим образом.

Пусть A и B — два принципа обеспечения защиты ЭНХО, состоящие из одних и тех же элементов x .

Тогда A и B совпадают, если выполняется соотношение [6]

$$\forall x (x \in A = x \in B) \rightarrow (A = B). \quad (1)$$

В основе определения претендентов в систему принципов обеспечения защиты ЭНХО лежит также третий внутрисистемный принцип, утверждающий, что для произвольной совокупности, множества элементов существует правило выбора. При этом сам процесс выбора определяет вид используемого правила. Принцип выбора позволяет определить тип системы принципов обеспечения защиты ЭНХО, однако не дает ни малейшего намека на то, как его провести. Реализацией этого внутрисистемного принципа выбора является «аксиома выбора».

Обозначим через A — некоторую совокупность непустых непересекающихся множеств элементов или группы элементов (принципов).

Тогда найдется принцип B , содержащий ровно по одному элементу из каждого непустого не-

пересекающегося множества X , принадлежащего A [7]

$$\forall x \in A \& \forall y \in A (X \neq \emptyset) \& [(X \neq Y) \rightarrow \\ \rightarrow (X \cap Y = \emptyset)] \rightarrow$$

$$\rightarrow \exists B \forall x \in A \exists x \forall y [(y \in B \cap X) = (y = x)]. \quad (2)$$

Заметим, что высказывательная функция

$$\exists x \forall y \{(y \in B \cap x) = (y = x)\} \quad (3)$$

утверждает существование такого x , что условия $y \in B \cap X$ и $y = x$ будут эквивалентны. Поэтому элемент x — единственный элемент произведения $B \cap X$. И рассматриваемая высказывательная функция утверждает, что это произведение имеет только один элемент.

Определим далее функцию выбора на множестве X составляющих принципов обеспечения защиты ЭНХО как функцию f с областью определения $X - \{\emptyset\}$, такую, что $f(x) \in Y$ для всех x из области определения f . Тогда, следуя Цермело, можно утверждать: для каждой совокупности A непустых множеств принципов найдется такая функция f , что $f(x) \in X$ для каждого принципа X из совокупности A .

Нетрудно понять, что обе формулировки полностью эквивалентны друг другу.

Четвертый, основной — внутрисистемный принцип существования системы принципов обеспечения защиты ЭНХО будет следующий.

Пусть имеется некоторая совокупность элементов или групп элементов. Если каждый элемент из этой совокупности принадлежит системе принципов обеспечения защиты энергетических народнохозяйственных объектов, то указанная совокупность принципов есть система принципов. Реализация этого внутрисистемного принципа существования обеспечивается «аксиомой выделения».

Пусть для произвольного множества A принципов обеспечения защиты ЭНХО существует еще и принцип B , состоящий из тех и только тех элементов множества A , которые (будучи подставлены на место переменных x) удовлетворяют Φ [7]:

$$\forall x \{(x \in B) = [(x \in A) \& \Phi(x)]\}. \quad (4)$$

Если в $\Phi(x)$ встречаются свободные переменные, отличные от x , то они играют роль параметров, от которых зависит принцип B .



Очевидно, что B однозначно определяется высказывательной функцией Φ , множеством A и выбором переменных x .

Пятый внутрисистемный принцип обеспечения защиты энергетических народнохозяйственных объектов утверждает: объединение всех элементов любой системы принципов и самих этих систем есть система принципов. Формально этот принцип описывается «аксиомой объединения», которая имеет вид [6]

$$\exists y \forall z (z \in y \leftrightarrow \exists x \in x (z \in x)). \quad (5)$$

Шестой внутрисистемный принцип обеспечения защиты ЭНХО можно определить так: совокупность всех подмножеств элементов произвольной системы принципов является системой принципов. Его реализует «аксиома степени», которая имеет вид [6]

$$\exists x \forall y (y \in x \leftrightarrow y \subseteq x). \quad (6)$$

Рассмотрим следующий, седьмой, внутрисистемный принцип обеспечения защиты ЭНХО.

Пусть задана некоторая операция, реализуемая элементами системы принципов. Тогда совокупность всех таких элементов есть система принципов обеспечения защиты энергетических народнохозяйственных объектов. Указанный принцип выполняет «аксиома подстановки». Для ее формализованной записи введем теперь понятие унарной операции [6].

Будем считать, что унарная операция F вводится путем определения $F(x)$ как единственного y , такого, что $\varphi(x, y)$ есть произвольная формула, не содержащая F .

Пусть теперь задана некоторая унарная операция F , реализуемая элементами, образующими множество x . Тогда совокупность всех $F(y)$ таких, что $y \in x$, — это принцип обеспечения защиты энергетических народнохозяйственных объектов [6], а обеспечивающая его аксиома может быть представлена в виде

$$\exists y \forall z (z \in y \leftrightarrow \exists x (x = F(y))). \quad (7)$$

Остановимся теперь на восьмом внутрисистемном принципе обеспечения защиты ЭНХО, утверждающем, что процесс построения системы принципов не ограничен во времени («непрерывен») и в плане достижения новых свойств (в силу изменения внешних условий) может продолжаться сколь угодно долго. Этот принцип определяется «аксиомой бесконечности». В ее основе лежит существование непустого множе-

ства принципов x , одним из элементов которого является пустое множество и которое содержит вместе с каждым своим элементом $y \in x$ множество [6]

$$z = \{w : w \in y \vee w = y\}. \quad (8)$$

Тогда формально ее можно записать в виде

$$\exists x ((\exists y \in x \forall z (z \notin y) \& \forall y \in x \exists z \in x \forall w (w \in z \leftrightarrow w \in y \vee w = y))). \quad (9)$$

Назовем теперь минимальными элементы, которые не имеют общих элементов, т. е. обладают свойством самостоятельности [8–10]. Тогда следующий, десятый, внутрисистемный принцип обеспечения защиты ЭНХО будет состоять в том, что каждая система принципов имеет минимальный элемент. Этот принцип находит свою реализацию в «аксиоме регулярности», которую формально можно представить в виде [6]

$$\exists y (y \in x) \rightarrow \exists y \in x \forall z \in y (z \notin x). \quad (10)$$

Наконец, заключительный, одиннадцатый, внутрисистемный принцип обеспечения защиты ЭНХО определяет связность (взаимосвязанность) элементов в системе принципов и состоит в том, что каждый элемент системы связан с другим элементом либо непосредственно, либо через последовательность элементов, и это обеспечивает их взаимодействие, а не взаимозаменяемость друг друга. Он позволяет объединить связями (отношениями) в единое целое элементы — принципы обеспечения защиты энергетических народнохозяйственных объектов, придающие этой системе эмерджентные свойства, которыми не обладал ни один отдельно взятый принцип. Отображением этого принципа является «аксиома связности», которая формально может быть описана следующим образом.

Пусть A — система принципов обеспечения защиты ЭНХО, состоящая из элементов x , так что

$$A = \{x : x \in A\}. \quad (11)$$

Тогда каждый элемент x_i из A связан с другим элементом x_j либо непосредственно, либо через последовательность элементов $x_j (j = 0, 1, \dots)$. Здесь x_0 — пустой элемент, что может быть представлено в следующем виде:

$$x_i A I x_j \& x_j A I x_l \rightarrow x_i A I x_l, \quad (12)$$

где $j = 0, 1, \dots; x_0 = 0; AI$ — бинарное отношение эквивалентности, строгого или нестрогого порядка [4, 11].

Перечисленные внутрисистемные принципы позволяют не только определить метод защиты энергетических народнохозяйственных объектов, но и сформировать также представление о средствах обеспечения этой защиты ЭНХО как эмерджентном объекте, взаимосвязанном с другими объектами той же или иной природы и взаимодействующим с ними, которые со своей стороны будут предъявлять к нему определенные требования.

Возможность выхода на «более высокую орбиту взаимосвязи и взаимодействия» с другими объектами требует выполнения уже ряда «глобальных» системных принципов, которые придают системе принципов обеспечения защиты ЭНХО целостные свойства с точки зрения взаимодействия с внешними целостными объектами. К их числу относят [12]:

принцип системного единства, состоящий в том, что при создании, функционировании и развитии системы принципов обеспечения защиты ЭНХО связи между составляющими ее элементами должны обеспечивать ее целостность;

принцип развития, заключающийся в том, что система принципов обеспечения защиты ЭНХО должна создаваться и функционировать с учетом пополнения, совершенствования и обновления составляющих ее элементов;

принцип совместимости, требующий, чтобы информационные и «технические» характеристики системных связей между элементами обеспечивали совместное их функционирование и сохраняли открытой систему принципов обеспечения защиты ЭНХО в целом;

принцип «стандартизации», заключающийся в проведении унификации, типизации и стандартизации элементов системы принципов обеспечения защиты ЭНХО, а также в установлении правил с целью упорядочивания деятельности в области создания и развития такого рода систем.

Правомочность применения такого подхода полностью определяется «принципом внешних дополнений» Ст. Бира и теоремой неполноты К. Геделя [13]: каждый новый принцип обеспечения защиты энергетических народнохозяйственных объектов — это очередное внешнее дополнение, и с каждой новой проблемой возникает еще один вопрос, требующий разрешения.

Таким образом, разработанная система принципов обеспечения защиты ЭНХО, включающая взаимосвязанные и взаимодействующие внутрисистемные и глобальные принципы, отражает те практические соображения, которые позволяют использовать структурно-системный метод для защиты энергетических народнохозяйственных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большая советская энциклопедия [в 30-ти т.] [Текст] // 3-е изд. — Т. 20. — С. 588.
2. Соколов, Д.В. Основы организационного проектирования: структуризация хозяйственных объектов. Часть II [Текст]: учебное пособие / Д.В. Соколов; Санкт-Петербургский университет экономики и финансов. — СПб.: 1996. — С. 30.
3. Даль, В.И. Толковый словарь живого великорусского языка (в 4 томах). Т.4: С — V [Текст] / В.И. Даль. — М.: ОЛМА-ПРЕСС, 2003. — С. 62.
4. Бурбаки, Н. Начала математики [Текст] / Н. Бурбаки / Пер. с французского Г.Н. Поварова и Ю.А. Шихановича; под ред. В.А. Успенского. — М.: Мир, 1965. — Ч. 1. Основные структуры анализа. Кн. 1. Теория множеств. — 455 с.
5. Кулик, В.Т. Принципы алгоритмизации и построения управляющих машин [Текст] / В.Т. Кулик. — Киев: Гостехиздат УССР, 1963. — 311 с.
6. Справочная книга по математической логике. Часть 2: Теория множеств [Текст] / Под ред. Д. Барвайса; Пер. с английского В.Г. Канвея под ред. В.Н. Гришина. — М.: Наука, 1982.
7. Куратовский, К. Теория множеств [Текст] / К. Куратовский, А. Мостовский / Пер. с англ. М.И. Кратко; под ред. А.Д. Тайманова. — М.: Мир, 1970. — С. 61.
8. Домаков, В.В. Теория комплексирования в маркетинге медицинских товаров и услуг [Текст] / В. В. Домаков. — 313 с.;
9. Домаков, В.В. Методология количественного анализа структур хозяйственных объектов [Текст] / В.В. Домаков, Д.В. Соколов. — 163 с.;
10. Домаков, В.В. Методология количественного синтеза структур хозяйственных объектов на этапе реформирования российской экономики [Текст] / В.В. Домаков, Д.В. Соколов. — 204 с.
11. Шрейдер, Ю.А. Равенство, сходство, порядок [Текст] / Ю.А. Шрейдер. — М.: Наука, 1971. — 254 с.
12. Системы автоматизированного проектирования. Основные положения [Текст]. — М.: Изд-во стандартов, 1979. — 5 с.
13. Бир, С.Т. Кибернетика и управление производством [Текст] / С.Т. Бир; Под ред. А. Б. Челюстиной. — Изд. 2-е, доп. — М.: Наука, 1965. — 391 с.



АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ВНУТРЕННИХ И ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Как показывает практика, добиваться с помощью существующих методов построения организационных структур «систем управления» заданных, а тем более совершенно новых свойств защищенности энергетических народнохозяйственных объектов (ЭНХО) весьма трудно. Это в полной мере подтверждают последние события на Саяно-Шушенской ГЭС.

Отличительной чертой таких систем управления является их кажущаяся простота, естественным образом вытекающая из всеобщей ориентации на стабильную направленность социально-экономической сферы: она всегда была связана только с регулированием, которое обеспечивало их стабилизацию и исходило из нее, определяя тем самым соответствующее содержание и форму деятельности органов управления, реализующих посредством программного регулирования на различных уровнях защиту ЭНХО. По этой причине решение задач регулирования, т. е. частного случая управления, было в основном ориентировано на следующее:

унификацию структур аппарата управления (регулирования) по отношению к их основным элементам и численным значениям параметров [1];

определенную индивидуализацию, отражающую специфику деятельности аппарата управления (регулирования) конкретным объектом [2–4];

организационное проектирование аппарата управления (регулирования) в целях стабилизации его функционирования, определяемое изменением первичных переменных объектов: целей, среды, ресурсов, видов деятельности и т. д. [5]. Тем не менее все это позволило накопить определенный опыт в проектировании организационных структур аппарата управления (регулирования) ЭНХО для обеспечения их защиты.

Становится очевидным, что в меняющейся среде хозяйствования, обусловленной случайными природными, техногенными воздействиями,

а тем более при боевом применении ОМП, используемые методы организационного проектирования, ориентированные на стабилизацию не позволят обеспечить желаемой их защищенности. Поэтому в стратегическом, оперативно-тактическом и тактическом плане исключительно важна разработка методов защиты ЭНХО, ориентированных на указанную агрессивную меняющуюся среду их использования.

Как показывают и теория, и практика, именно такая меняющаяся среда, безусловно, будет влиять на содержание и форму метода защиты ЭНХО, при этом будут сказываться как физические свойства среды, так и свойства самой системы управления.

В условиях агрессивной меняющейся среды обеспечение защиты энергетических народнохозяйственных объектов приобретает особое значение, что в своей основе объективно, поскольку отражает определенные взгляды на закономерности, характеризующие важные тенденции реализации такой защиты. Проблематика защиты ЭНХО, а значит, и методов их обеспечения при случайных природных, техногенных воздействиях, а тем более при боевом применении ОМП, всегда выявляется тогда, когда в реализации защиты возникают практическая и теоретическая необходимость, вызванная:

реальными катаклизмами, наносящими ущерб ЭНХО, которые связаны с обеспечением жизнедеятельности населения страны обслуживающему их персоналу, в целом народному хозяйству;

насущными потребностями государства и общества;

задачами, поставленными Президентом РФ, Председателем правительства РФ, министром энергетики и министром по чрезвычайным ситуациям РФ;

закономерностями и тенденциями организационного проектирования и функционирования систем управления ЭНХО;

неудовлетворенностью от полученных ранее и получаемых в настоящее время научных, теоретических и практических результатов и т. п.

С учетом представлений, складывающихся ныне в российской науке, проблематику защиты ЭНХО естественно связать с установлением расхождений между желаемыми результатами, средствами и способами достижения замысла, входящими в него целями и задачами и реальными, реализуемыми сегодня в конкретной агрессивной среде, которые могут быть устранены неединственным образом. Выявление этой проблематики может основываться на логическом мышлении и на чувственном восприятии.

При логическом мышлении формируется представление о том, что в сложившихся условиях более эффективными будут другие, отличные от реализованных, методы защиты энергетических народнохозяйственных объектов в условиях агрессивной меняющейся среды хозяйствования, и о том, что необходимо предпринять для перехода в это состояние.

Главным условием применения чувственного восприятия, а значит, и быстрого разрешения проблематики защиты ЭНХО в агрессивной меняющейся среде хозяйствования является наличие необходимой информации и ресурсов в нужное время и в нужном месте.

В условиях агрессивной меняющейся среды хозяйствования проблемы обеспечения защиты ЭНХО, связанные прежде всего с разработкой методов их организационного проектирования, не возникают по одной и, как правило, взаимосвязаны. Источником возникновения этих проблем являются как изменения, происходящие в среде функционирования систем управления ЭНХО, так и изменения в складывающихся научных представлениях о разработке методов построения таких систем. Кроме того, изменения, происходящие в материальной среде, затрагивают интересы человека, заставляют его менять методы исследования и, тем самым, меняя ситуацию, воздействуют на разработку систем управления ЭНХО.

Перечисленные изменения могут быть также следствием ошибок отдельных ученых, которые для исследования процессов проектирования и функционирования систем управления энергетическими народнохозяйственными объектами использовали искусственные приемы и не акцен-

тировали свое внимание на стабильных естественных условиях. Неверные решения о содержании и форме проектирования и функционирования систем управления ЭНХО и методах их построения могут быть приняты в условиях неполноты, неопределенности и несвоевременности информации, неправильно поставленной задачи, недостаточной компетентности.

Кроме того, изменения могут возникнуть при упорядочивании ситуаций в результате изменения целостной ориентации ученых.

Наконец, изменения могут определяться имеющимися ресурсами и наступать по объективным причинам, не зависящим от воли и сознания ученых.

Будем понимать под средой, для которой проектируется и в которой функционирует система управления ЭНХО, любые компоненты, неподконтрольные субъектам управления этой системы, но способные активно воздействовать на ее структуру. Такая среда всегда будет накладывать ограничения на состояние структуры системы управления. Изменения, происходящие в среде, затрагивают интересы субъектов управления и тем самым, меняя ситуацию, безусловно, воздействуют на структуру самой системы управления.

В общем случае научно-техническая проблематика проектирования и функционирования систем управления ЭНХО, а значит, и методов обеспечения их защиты при случайных природных, техногенных воздействиях, тем более при боевом применении ОМП, весьма разнообразна. Однако все эти проблемы могут быть рассмотрены с точки зрения признаков изменения соответствующих процессов, к числу которых можно отнести изменения содержания, направления, скорости.

Изменение содержания проектирования и функционирования систем управления ЭНХО, а значит, и методов обеспечения их защиты, ориентированных на выявленные естественные закономерности, — источник возникновения его проблематики, когда реальное состояние и желаемое не совпадают по своему составу. Разрешение проблемы такого типа означает преобразование содержания и формы известных схем функционирования систем управления ЭНХО и методов их проектирования, которые могут базироваться, например, на совершенно иных принципах.



Изменение направления процессов функционирования систем управления ЭНХО и методов их проектирования — это другой источник возникновения проблем, когда для достижения желаемого результата необходимо изменить пропорцию ресурсов. Например, в сложившихся для России условиях это определяется следующими основными факторами:

- потерей ряда важных энергетических народнохозяйственных объектов, которые остались на территориях бывших советских республик;

- устареванием и моральным износом имеющихся в России систем управления ЭНХО;

- естественной убылью научных кадров, которые в условиях российского рынка и мизерной заработной платы просто уходят из науки.

Наконец, изменение скорости процессов функционирования систем управления ЭНХО, а значит, и методов их проектирования тоже следует отнести к источнику возникновения проблем, когда желаемое и реализованное его состояние совпадают, но характеризуются разными скоростями процессов.

С учетом изложенного проблематика используемых методов защиты ЭНХО в условиях меняющейся среды хозяйствования может быть определена следующим образом.

Первую проблему следует связать с диалектическим осмыслением возможности применения известных методов структуризации для обеспечения защиты ЭНХО при стабильной направленности социально-экономической сферы, определявших лишь возможность приближения к заранее заданному новому качеству защиты, которое всегда было весьма трудоемкой задачей. Это однозначно показывает весьма ограниченную применимость такого рода методов и определяет необходимость перехода от лежащей в их основе известной схемы «анализ — синтез» к новой схеме, учитывающей известный «прошлый» опыт, появившиеся новации, новые поражающие факторы и особенности меняющейся среды функционирования.

Вторая проблема обусловлена необходимостью уточнения используемых в настоящее время при обеспечении защиты ЭНХО «исходных положений, основополагающих идей, от которых нельзя отступить» [6], и разработки новых принципов обеспечения защиты энергетических на-

роднохозяйственных объектов с ориентацией на меняющуюся среду хозяйствования.

До настоящего времени в качестве таких основополагающих идей, обеспечивающих защиту ЭНХО методами организационного проектирования независимых систем управления этими объектами, по-существу, «сложных систем», использовались принципы, которые отражали потребности формализованного метода «синтез через анализ». Они носили чисто качественный характер и обеспечивали возможность такого организационного проектирования, которое лишь в некоторой степени отвечало заранее заданному гипотетическому эталонному варианту, ориентированному на единожды установленные условия использования. Такие принципы сводились в совокупности, элементы которых не рассматривались во взаимодействии, а определялись без остатка только своими свойствами, были их простой суммой.

При реализации структурно-системного метода защиты ЭНХО в условиях агрессивной меняющейся среды возникает острая потребность уже в системе «основополагающих идей», которая представляет собой совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих принципов и открывает возможность получения новых целостных свойств на основании известного «прошлого» опыта, оказывается ориентированной на него, а также на возможности уже известных ингредиентов.

Третью проблему свяжем с определением стратегии и тактики разработки структурно-системного метода защиты ЭНХО при ориентации на агрессивную среду функционирования.

Обычно методы защиты ЭНХО базировались на априорной идее «стабильной заданности структуры управления», а потому оказывались связанными с выявлением только отдельных внутренних противоречий.

В агрессивной среде функционирования защита ЭНХО потребовала выявления в полном объеме — и в статике, и в динамике — присущих им внутренних противоречий, а также установления в динамике внешних противоречий, которые определяются появлением уже нового, «защищенного» целостного ЭНХО. Это привело к необходимости выявления диалектических противоречий, которые включили в себя следующие взаимосвязанные и взаимодействующие компоненты [7, 8]:

параметрическое представление энергетического народнохозяйственного объекта, позволяющее с помощью свойства или совокупности свойств отличить его от других аналогичных объектов;

морфологическое (структурное) представление народнохозяйственного объекта, позволяющее установить в статике с помощью его функциональной и организационной структур внутренние, присущие именно ему противоречия;

системное представление ЭНХО, позволяющее установить в динамике внутренние, присущие ему противоречия, проявляющиеся во взаимодействии его элементов друг с другом;

системное представление ЭНХО, позволяющее установить в динамике внешние противоречия, проявляющиеся во взаимодействии этого целостного объекта с другими целостными объектами.

Этот способ, обеспечивающий применение эвристической схемы «анализ — синтез — анализ», представляет собой основу для разработки обобщенной схемы структурно-системной защиты ЭНХО, которую можно рассматривать как развитие известных схем защиты.

Существо четвертой проблемы связано с разработкой параметрического, морфологического и системного методов анализа ЭНХО и определением их областей работоспособности.

Применение метода функциональных характеристик оказалось бесперспективным и при проектировании «систем управления» как средства обеспечения защиты ЭНХО с ориентацией разработки на стабильные условия использования, так и для их оценки с ориентацией на агрессивную меняющуюся среду. По сути, метод функциональных характеристик, как и любой критериальный метод, требовал не только обоснованного выбора самих функциональных характеристик, но и их пороговых значений, в отношении которых делались суждения о качестве исследуемого объекта. Все это определило необходимость разработки: специального, основанного на теории отношений, параметрического метода анализа ЭНХО и определение их областей работоспособности; морфологического метода их анализа, выявляющего в статике внутренние присущие им противоречия, и системного метода анализа, позволяющего

исследовать внутренние и внешние динамические противоречия при взаимодействии составляющих их элементов и самих рассматриваемых целостных объектов с другими целостными объектами.

Наконец, в качестве пятой проблемы выступает собственно синтез энергетических народнохозяйственных объектов при их структурно-системной защите, что связано прежде всего с разработкой их функциональной и организационной структур.

Конкретизация представлений о функции и суперпозиции функций как элементах функциональной структуры ЭНХО позволяет поставить задачу ее оптимизации, в которой каждая функция рассматривается в качестве конкурента по отношению к аналогичным функциям. Значение функциональной структуры позволяет обратиться к синтезу организационной структуры энергетического народнохозяйственного объекта. При организационной структуризации технологические схемы превращались в план действий путем уточнения параметров отдельных операционных объектов. Такие технологические и организационные аспекты при организационной структуризации в целом носили чисто эвристический характер, а строгих результатов и строгих оценок почти не было.

В то же время решение такого рода задач тесно связано с необходимостью рационального расходования имеющихся ограниченных ресурсов. Это определяет возможность разработки типовых проектных решений и оптимизации номенклатуры элементов организационной структуры ЭНХО, что позволяет ограничиться «проектной привязкой» типовых решений и детальной проработкой всего такого объекта.

Для последующего синтеза динамически непротиворечивого ЭНХО может быть использовано множество его статических функциональных и организационных структур, определяемых совокупностью его основной и резервных конфигураций, среди которых будет находиться и та, которая минимизирует внутренние и внешние динамические противоречия. В этом случае речь, безусловно, идет об оперативном синтезе энергетического народнохозяйственного объекта как целостной системы.

Разработка и решение перечисленных задач составляют существо работы авторов.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сыроежин, И.М.** Системный анализ процессов формирования экономических и организационных структур [Текст] / И.М. Сыроежин. — Л: Изд-во ЛФЭИ, 1982. — 82 с.
2. **Месарович, М.** Основания общей теории систем [Текст] / М. Месарович // Общая теория систем / Пер. с англ. В.Я. Алтаева и Э.Л. Наппельбаума.
3. **Соколов, Д.В.** Теоретические и методические предпосылки моделирования организационно-экономических структур хозяйственных систем [Текст] / Д.В. Соколов. — Л: Изд-во ЛГУ, 1986. — 134 с.
4. **Соколов, Д.В.** Проблемы формирования организационной структуры управления в условиях обновления продукции в объединении [Текст] / Д.В. Соколов, Н.Г. Колосова, Л.К. Франева // Межвуз. сб.: Структурные и организационные проблемы управления социалистическим производством. — Л: Изд-во ЛФЭИ, 1988. — 102 с.
5. **Вяткин, В.Н.** Организационное проектирование хозяйственных комплексов [Текст] / В.Н. Вяткин. — М: Экономика, 1987. — 103 с.
6. Большая советская энциклопедия [в 30-ти т.] [Текст]: Т. 20. — 3-е изд. — М.: «Сов. энциклопедия». 1975. — С. 588.
7. **Домаков, В.В.** Теория комплексирования в маркетинге медицинских товаров и услуг [Текст] / В.В. Домаков.
8. **Домаков В.В.** Антропологические аспекты проблемы управления социально-экономическим развитием в условиях глобализации и реформирования [Текст] / В.В. Домаков.

УДК 622.323

*Т.Ю. Иванова***ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ**

В 2000 году вступило в силу Постановление Правительства РФ № 613 от 21 августа 2000 года «О неотложных мерах по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов», согласно которому в целях предупреждения и ликвидации последствий разливов нефти и защиты населения и окружающей природной среды от их вредного воздействия требуется разрабатывать планы по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов (далее План ЛРН) всем организациям (независимо от формы собственности), осуществляющим добычу, переработку, транспортировку и хранение нефти и нефтепродуктов.

1 мая 2005 года вступил в силу Приказ МЧС РФ № 621 от 28. 12. 2004 «Об утверждении Правил разработки и согласования планов по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации». «Настоящие Правила устанавливают общие требования к планированию мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов и чрез-

вычайных ситуаций, обусловленных разливами нефти и нефтепродуктов (далее — ЧС(Н)), а также определяют порядок согласования и утверждения планов по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов (далее — Планы) и соответствующих им календарных планов оперативных мероприятий при угрозе или возникновении ЧС(Н) (далее — Календарные планы) для функциональных и территориальных подсистем единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (далее — РСЧС) и организаций, независимо от форм собственности, осуществляющих разведку месторождений, добычу нефти, а также переработку, транспортировку, хранение и использование нефти и нефтепродуктов, включая администрацию портов (далее организации)» [5]. Но фактически данный документ в основном содержит только указания, в каких органах должны быть утверждены и согласованы Планы ЛРН в зависимости от уровня разлива, а также структуру Плана ЛРН и перечень обязательных и рекомендуемых приложений. Никаких кон-

кретных указаний на методики расчета необходимых сил и средств для локализации и ликвидации разливов в вышеуказанном документе нет.

Прошло уже более пяти лет с момента вступления в силу названного Приказа МЧС РФ № 621. Методики для расчета необходимого количества сил и средств для локализации и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов так и не были разработаны. В связи с этим возникает масса проблем и разночтений при согласовании Планов ЛРН в соответствующих органах власти. Основным и определяющим критерием служит установленное в [4] время локализации разлива нефти и нефтепродуктов, которое не должно превышать четырех часов при разливе в акватории и шести часов — при разливе на почве.

В связи с тем, что большинство объектов нефтедобывающей промышленности располагаются в труднодоступных районах страны, аварийно-спасательные формирования (далее АСФ), которые аттестованы на данный вид деятельности и имеют право осуществлять работы по локализации и ликвидации чрезвычайных ситуаций, обусловленных разливами нефти и/или нефтепродуктов (далее ЧС(Н)), не успевают осуществить необходимый вид работ в установленные временные рамки. Кроме того, их привлечение требует существенных затрат со стороны владельца объекта, на котором произошла ЧС(Н), особенно если для доставки в район аварии сил и средств потребуется использование авиатранспорта. В связи с этим организации зачастую умалчивают о произошедших у них на объектах ЧС(Н) — разливах локального и муниципального уровня, а это сотни тонн нефти и нефтепродуктов. Устранение последствий ЧС(Н) собственными непрофессиональными силами организации наносит существенный ущерб окружающей среде: зачастую ликвидация разлива осуществляется выжиганием нефтезагрязненных участков почвы, что неприемлемо. Кроме того, происходит искажение статистики ЧС(Н), а это негативно отражается на общей оценке рисков для опасных производственных объектов.

Вопрос управления в чрезвычайных ситуациях до сих пор не имеет математической основы, моделирующей различные процессы.

Разработка методик расчета количества необходимых сил и средств при локализации и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов на базе методов математического

программирования придадут вопросу управления в ЧС отсутствующую в настоящее время научную основу. Применение таких методик при разработке Планов ЛРН, а также других документов по ГО, ЧС и промышленной безопасности поможет снизить ущерб от ЧС(Н) для окружающей среды, а также снизить затраты организации на ликвидацию их последствий.

Сущность управления в ЧС должна состоять в выборе оптимальных вариантов действий, зачастую в условиях неопределенности. При этом, естественно, каждое решение должно приниматься на основе анализа определенной модели и по конкретному критерию.

Большинство задач управления в ЧС можно объединить в несколько классов по их целям:

- распределение сил и средств, предназначенных для ликвидации последствий аварийных ситуаций;

- создание запасов продовольствия, воды, топлива для защитных сооружений при неопределенном сроке пребывания людей;

- выбор оптимальных маршрутов движения сил ликвидации последствий аварии или наиболее безопасных маршрутов перевозки опасных грузов;

- обеспечение наиболее устойчивой связи;

- определение оптимальных сроков проведения профилактических работ в интересах повышения безопасности;

- оптимизация времени проведения восстановительных или иных неотложных работ на радиационно или химически опасной территории, и т. д.

Перечисленные выше классы задач можно свести к задачам линейного, динамического либо нелинейного программирования.

В форме решения задач линейного программирования можно выбирать оптимальные варианты на моделях ситуаций, особенно в матричной постановке. Это: задачи прогнозных оценок рациональных запасов сырья или продовольствия; широкий класс так называемых транспортных задач по выбору рациональных маршрутов передвижения или рациональных планов доставки необходимого количества грузов с ограниченного числа складов (поставщиков); целый ряд иных задач управления в ЧС, где целевая функция и ограничения могут быть представлены в виде линейных зависимостей.

Динамическое программирование, или динамическое планирование, представляет собой осо-

бый метод выбора оптимальных решений в многошаговых (многоэтапных) операциях. В этом случае принятие оптимального управления в целом определяется соответствующим выбором действий на каждом этапе, каждом шаге таким образом, чтобы добиться экстремума глобального критерия, что и составляет существо динамического программирования.

Задачи нелинейного программирования представляют собой особенно сложный процесс выработки оптимальных вариантов управления в тех случаях, когда рассматриваются большие системы и целевые функции или ограничения не могут быть представлены линейными зависимостями. Для решения таких задач используются: метод множителей Лагранжа, методы покоординатного или градиентного спуска, принцип максимума Понтрягина, метод Монте-Карло и т. д.

Современные компьютерные средства дают возможность достаточно оперативно и с высокой точностью решать задачи перечисленных типов. Но достаточно сложны постановка задачи и ее представление в формализованном виде.

Постановка задачи базируется на квалификации специалиста не только в математическом аспекте, но и требует уверенных, глубоких знаний существа проблемы, в оценке прогнозируемых последствий ЧС, значимости и цели принятия оптимального управления.

Ниже приводится один из примеров принятия решения в простейшей ситуации на основе решения задачи линейного программирования.

В большинстве случаев задача управления может быть сведена к матричной постановке (игре) выбора оптимального варианта действий в смешанных стратегиях.

Можно доказать, что решение любой конечной игры $m \times n$ может быть сведено к задаче линейного программирования.

Пусть в игре $m \times n$ (табл. 1) требуется найти решение, т. е. необходимо найти две оптимальные смешанные стратегии, заданные векторами S_A^* , S_B^* вероятностей, с которыми применяются соответствующие стратегии:

$$S_A^* = (p_1, p_2, \dots, p_m); S_B^* = (q_1, q_2, \dots, q_n), \quad (1)$$

где

$$\sum_{i=1}^m p_i = 1, \quad \sum_{j=1}^n q_j = 1. \quad (2)$$

Цена игры v неизвестна.

В итоге решение игры $m \times n$ свелось к следующей математической задаче: определить неотрицательные значения переменных x_1, x_2, \dots, x_m , удовлетворяющих линейным ограничениям и доставляющих минимум линейной функции

$$L(x) = x_1 + x_2 + \dots + x_m. \quad (3)$$

Это типичная задача линейного программирования. Для данной постановки она адекватна выбору таких решений, при которых цена игры будет максимальна.

Для поиска решения в интересах стороны B рассуждения будут идентичными с той лишь разницей, что сторона B стремится минимизировать выигрыш стороны A , т. е. максимизировать величину $1/v$.

Требуется найти такие значения переменных y_j , при которых в условиях ограничений обращается в максимум линейная функция

$$L(y) = y_1 + y_2 + \dots + y_n = \frac{1}{v}. \quad (4)$$

Вместо максимума функции $L(y)$ можно искать минимум функции

$$\bar{L}(y) = -L(y) = -\frac{1}{v} = -y_1 - y_2 - \dots - y_n. \quad (5)$$

Таблица 1

Расширенная платежная матрица

$A \setminus B$	B_1	...	B_j	...	B_n	P
A_1	a_{11}	...	a_{1j}	...	a_{1n}	P_1
A_2	a_{21}	...	a_{2j}	...	a_{2n}	P_2
...
A_m	a_{m1}	...	a_{mj}	...	a_{mn}	P_m

Таким образом, решение игры $m \times n$ удалось свести к двум задачам линейного программирования.

Заметим, что решение задачи линейного программирования в данных условиях всегда существует.

Конкретизируем пример. Пусть произошло загрязнение нефтью береговой полосы. Вся загрязненная территория по условиям местности разделена на 4 участка — B_0, B_1, B_2, B_3 площадью соответственно $b_0 = 180 \text{ м}^2, b_1 = 240 \text{ м}^2, b_2 = 330 \text{ м}^2, b_3 = 190 \text{ м}^2$. Для ликвидации последствий аварийного разлива нефти выделено три подразделения — A_0, A_1, A_2 .

Производительность одного человека за смену (табл. 2) зависит от степени подготовленности и технического оснащения подразделения, а также от характеристик местности, т. е. от участка, на котором будет работать человек.

Таблица 2

Производительность одного человека из разных подразделений за смену, м^2

$A \setminus B$	B_0	B_1	B_2	B_3
A_0	18	22	20	12
A_1	23	18	25	19
A_2	14	16	30	8

Требуется найти оптимальное распределение работников по участкам с целью очистки береговой полосы от загрязнения при минимальной численности выделяемых работников.

Поставленная задача сводится к задаче линейного программирования (распределение ресурсов), ее решение выполнено средствами Mathcad.

Целевая функция представлена в виде

$$F(x) = \sum_{i=0}^2 \sum_{k=0}^3 a_{i,k} x_{i,k}.$$

Ограничения: $\sum_{i=0}^2 a_{i,j} x_{i,j} \geq b_j$ для $j = 0, 1, 2, 3$,

где $a_{i,k}$ — элемент матрицы (см. табл. 2); $x_{i,k} = 0$ — число сборщиков, выделяемых из состава i -го подразделения для уборки k -й территории.

Задача состоит в выборе такого вектора x , при котором функция $F(x)$ достигнет минимума при условии, что будут убраны все площади участков B_0, B_1, B_2, B_3 .

Результаты решения сведены в табл. 3.

Таблица 3

Оптимальное распределение численности сборщиков нефти по территориям

$A \setminus B$	B_0	B_1	B_2	B_3
A_0	0	11	0	0
A_1	8	0	0	10
A_2	0	0	11	0

В общей проблеме управления в чрезвычайных ситуациях наиболее значимым являются ситуации, связанные с авариями при добыче, переработке, транспортировке и хранении углеводородного топлива: нефти, нефтепродуктов, сжиженных и сжатых газов.

В результате расчета количества необходимых сил и средств при локализации и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов на основе задач математического программирования вопрос управления в ЧС приобретет отсутствующую в настоящее время математическую основу.

Методики, которые будут созданы на основе изложенных подходов, впоследствии могут быть использованы при разработке документации по промышленной безопасности, в том числе Планов по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов (Постановление Правительства РФ от 21.08.2000 г. № 613).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черняк, А.А. Математика для экономистов на базе Mathcad [Текст] / А.А. Черняк [и др.]. — СПб.: БХВ-Петербург, 2003. — 485 с.
2. Яковлев, В.В. Экологическая безопасность, оценка риска [Текст] / В.В. Яковлев. — СПб., 2008. — 501 с.
3. Вагнер, Г. Основы исследования операций: т. 1 [Текст] / Г. Вагнер. — М.: Мир, 1972. — 335 с.

4. Постановление Правительства РФ № 613 от 21 августа 2000 года «О неотложных мерах по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов» [Текст].

5. Приказ МЧС РФ № 621 от 28. 12. 2004. «Об утверждении Правил разработки и согласования планов по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации» [Текст].

УДК 614.841.34

А.Ю. Акулов, В.А. Иванов, А.В. Аксенов

ОГНЕЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ТЕРМОСТОЙКИХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Необходимость повышения огнестойкости стальных конструкций, используемых в нефтегазовом комплексе (НГК), возникает по причине несоответствия фактического предела огнестойкости ($ПО_{ф}$) пределу огнестойкости требуемому ($ПО_{тр}$) вследствие недостаточной огнестойкости металлических конструкций: условие $ПО_{ф} \geq ПО_{тр}$ не выполняется [1]. Увеличение огнестойкости металлических конструкций возможно за счет нанесения на них различных огнезащитных составов.

Проведенный анализ существующих вспучивающихся и не вспучивающихся огнезащитных составов выявил их отрицательные стороны. К ним относятся: низкая огнестойкость; необходимость наносить покрытие на заранее подготовленную поверхность, причем в условиях положительных температур и нормальной влажности; низкие адгезионные свойства составов; «работа» составов в условиях влажности до 85 %; сложность составов и т. д. Перечисленные отрицательные стороны приводят к необходимости разработки составов с лучшими эксплуатационными показателями. Как наиболее перспективные для разработки огнезащитного состава были выбраны не вспучивающиеся покрытия на основе минеральных термостойких заполнителей. В состав разработанного покрытия входят: вспученный вермикулит и перлит, микросферы, асбест, цемент, водоудерживающие добавки, сухие латексы и пластификаторы. Для определения качественных показателей по-

крытия металлоконструкций проведен ряд испытаний по ГОСТ 17177-94 [2] и ГОСТ 15140-78 [3]. Определены следующие физико-механические показатели: объемная масса; прочность на сжатие; величина адгезии; водопоглощение. Полученные физико-механические свойства приведены в таблице.

Проведенные исследования физико-механических свойств различных разработанных композиций огнезащитного состава позволили сформулировать методику проектирования состава под конкретные свойства. В основу данной методики заложен графический способ определения свойств материалов с помощью треугольных номограмм «состав — свойство» [4]. Конечным результатом разработки методики стало построение номограмм (рис. 1, 2) с кривыми для нахождения компонентного состава в зависимости от заданного свойства разрабатываемого огнезащитного состава. На номограммах точкам 1–5 соответствуют показатели физико-механических свойств пяти композиций, приведенных в табл. 1. С помощью номограммы на рис. 1, ключевой в дальнейшем расчете необходимого количества минеральных термостойких компонентов или искомого свойства состава, определяется необходимое количество цемента и добавок.

Номограмма, приведенная на рис. 2, позволяет находить необходимое количество вспученного вермикулита и перлита, асбеста и микросферы алюмосиликатной. Разработанные номограммы «состав — свойство» позволяют определять не

Физико-механические свойства огнезащитного состава

Свойство	Показатели свойств композиций				
	1	2	3	4	5
Водопоглощение, %	79,0	52,0	16,3	15,0	11,9
Адгезия	Неудовл.	Неудовл.	Удовл.	Удовл.	Удовл.
Объемный вес, кг/м ³	130	142	360	492	522
Прочность на сжатие, МПа	0,3	1,1	1,5	1,8	2,0

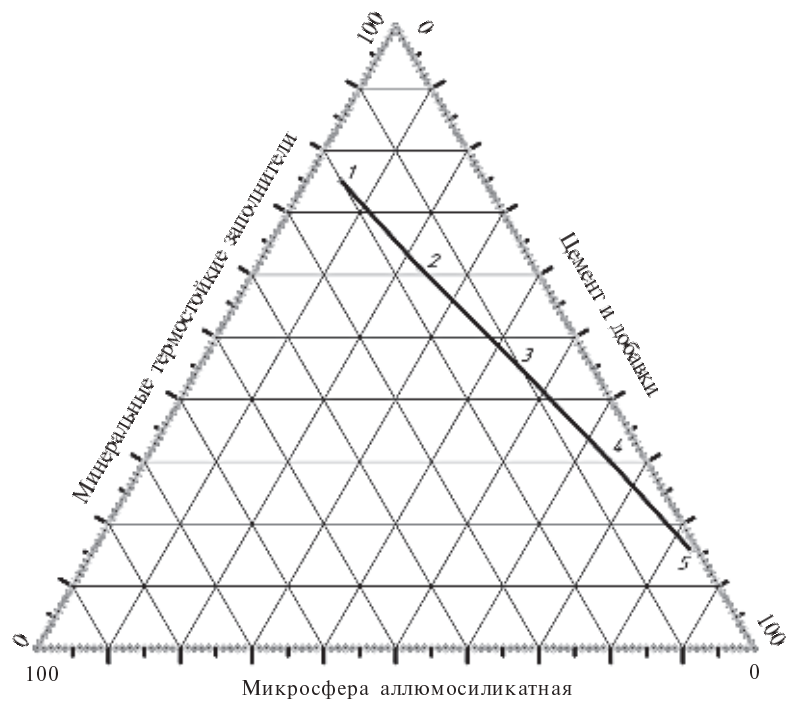


Рис. 1. Процентное содержание микросферы аллюмосиликатной при различных заданных свойствах огнезащитного состава

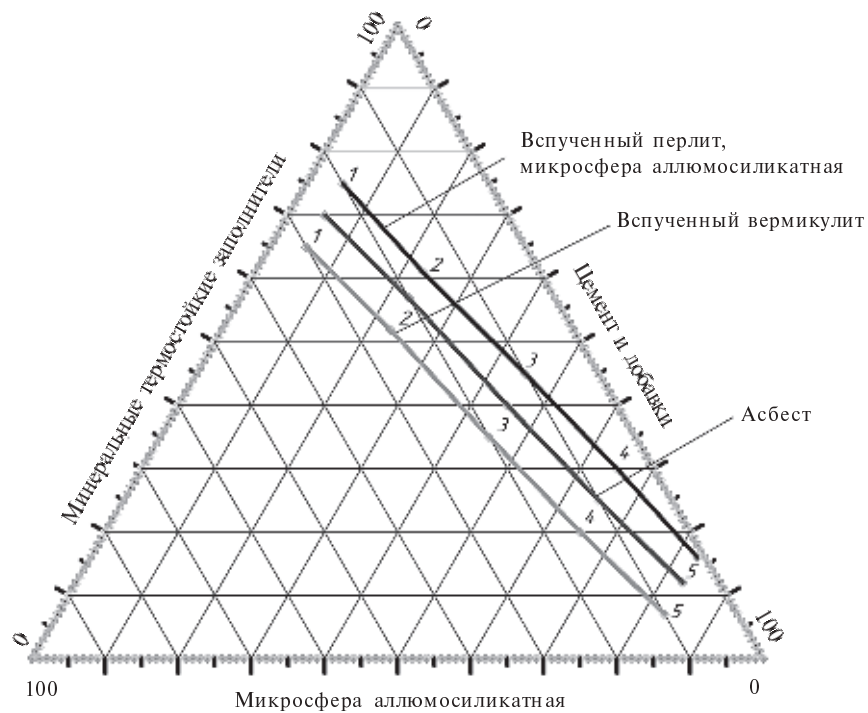


Рис. 2. Процентное содержание искомых компонентов при различных заданных свойствах огнезащитного состава

только процентный компонентный состав огнезащитного покрытия, но и предусмотренные в них физико-механические свойства покрытия (объемный вес, водопоглощение, прочность).

Испытания на огнестойкость партии образцов стальных пластин, защищенных от огня покрытием различной толщины, проводились в соответствии с ГОСТ Р 53295-2009 [5]. График, приведенный на рис. 3, характеризует огнестойкость металлической пластины в зависимости от толщины огнезащитного покрытия композиции № 3 (см. табл. 1).

Проведенные исследования [5] позволили определить зависимость огнестойкости от при-

веденной толщины металла и толщины покрытия (рис. 4). Разработанное покрытие обеспечивает максимальный предел огнестойкости металлоконструкций 240 минут при толщине защитного слоя 50 мм.

Результаты проведенных исследований огнестойкости позволили сформулировать методику подбора сечения несущих металлических конструкций с огнезащитным покрытием различной толщины в зависимости от требуемой их огнестойкости для объектов нефтегазового комплекса. Необходимо использовать зависимости на рис. 3. Так, при требуемой огнестойкости 240 мин возможно применение метал-

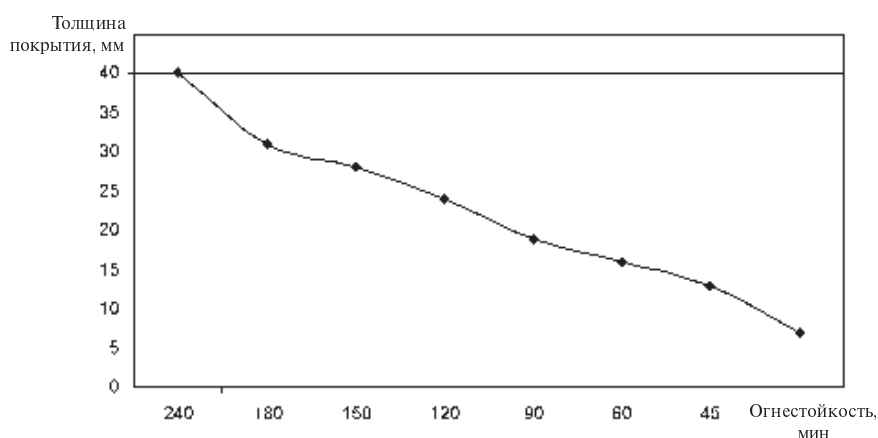


Рис. 3. Зависимость предела огнестойкости стальной пластины от толщины покрытия

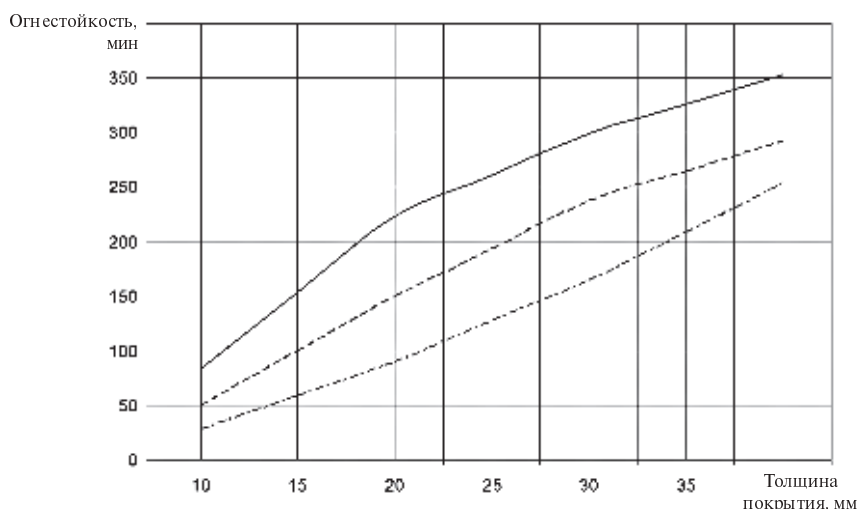


Рис. 4. Зависимость огнестойкости от толщины металла при разных приведенных толщинах покрытия (..... — 3,4 мм; ---- — 5,2 мм; — — — — 9,1 мм)

лического элемента с приведенной толщиной металла 3,4 мм, 5,2 мм или 9,1 мм (что зависит от нагрузки, действующей на данную конструкцию, и условий ее эксплуатации). Причем возможно определение необходимой толщины покрытия для каждого сечения металлического элемента. Данные зависимости также позволяют определить необходимую толщину покрытия при известных значениях приведенной толщины металла.

Разработанное огнезащитное покрытие на минеральных термостойких заполнителях обладает высокими эксплуатационными показателя-

ми, а также обеспечивает повышенный предел огнестойкости металлических конструкций НГК. Возможно его использование для огнезащиты металлоконструкций объектов нефтегазовой отрасли, находящихся в атмосферных условиях. Проведенные исследования физико-механических свойств и огнестойкости покрытия привели к разработке методик проектирования огнезащитных составов в зависимости от предъявляемых требований к свойствам, сечению и огнестойкости металлических конструкций. Эти методики значительно упрощают процесс проектирования огнезащиты составов для металлических конструкций объектов НГК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демехин, В.Н. Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре [Текст] / В.Н. Демехин, И.Л. Мосалков [и др.].— М.: АГПС МЧС России, 2003.— 656 с.
2. ГОСТ 17177-94. Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний [Текст].— М., 1994.
3. ГОСТ 15140-78. Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии [Текст].— М., 1978.
4. Денисов, А.С. Теплоизоляционные жаростойкие торкрет-массы на основе вермикулита [Текст] / А.С. Денисов, В.А. Швыряев.— М.: Стройиздат, 1973.— 104 с.
5. ГОСТ Р 53295-2009. Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности [Текст].— М., 2009.

УДК 614.841.34

С.А. Бараковских, В.А. Иванов, С.А. Плотников

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОЖАРА НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

Аварийные ситуации на объектах нефтегазовой промышленности в большинстве случаев сопровождаются пожарами. Поэтому одно из основных направлений обеспечения промышленной безопасности — это противопожарная защита объектов нефтегазовой отрасли. При горении на пожарах выделяется большое количество теплоты, значительная часть которого передается объектам, окружающим очаг пожара, посредством излучения. Если падающее на смежные объекты излучение превышает величину критической плотности излучения для материалов или веществ, происходит возникновение новых очагов возгораний и пожаров.

Ограничение распространения пожара — один из основных аспектов противопожарной защиты. Исследованию способов и устройств, препятствующих распространению пожара, посвящено значительное количество экспериментальных и теоретических работ, направленных на уменьшение величины теплового потока за счет твердых материалов и тонкораспыленной воды. При горении углеводородов основным средством тушения служит воздушно-механическая пена, поэтому в работе были обоснованы принципы устройств, предназначенных для ослабления теплового излучения с применением воздушно-механической пены.



Принимая во внимание существующие способы и устройства противопожарной защиты [1–4], для ослабления теплового излучения можно применять конструкцию, выполненную в виде двух параллельных плоскостей, пространство между которыми заполнено воздушно-механической пеной.

В нашей работе параллельные плоскости конструкций, ограничивающих распространение пожара, выполнялись из металлических сеток и перфорированного стекломатного листа (СМЛ).

При работе с металлическими сетками эмпирическим путем определено, что оптимальный размер ячейки, при котором пена не будет выходить из сетчатого объема, составляет 0,094–1 мм. Однако по мере увеличения кратности пены она становится легче и удельный вес ее уменьшается, а при достаточно большой кратности удельный вес пены практически равен удельному весу газа. Исходя из этого путем испытаний была определена устойчивость пены в сетчатом объеме в зависимости от кратности:

Кратность пены	Время устойчивости, с
<i>для генератора пены средней кратности</i>	
110	750
150	780
180	900
<i>для генератора пены высокой кратности</i>	
190	890
260	920
290	970

На следующем этапе определили высоту конструкции. В ходе испытаний установлено, что максимальное время устойчивости пены в такой конструкции достигается при высоте ее столба 2100–2200 мм, соответственно оптимальная высота составляет 2000 мм. Если высота защищаемого технологического оборудования выше 2000 мм, то для ослабления теплового излучения конструкции можно выполнить в виде этажерок, т. е. через каждые 2000 мм по высоте конструкции устраивать пеноудерживающие полки (диафрагмы) и воздушно-механическую пену подавать в каждый отсек (рис. 1).

Огневые испытания проводились по методике ГОСТ 25380-82 [5], основанной на измерении перепада температуры наружной и внутренней поверхности ограждающей конструкции, при

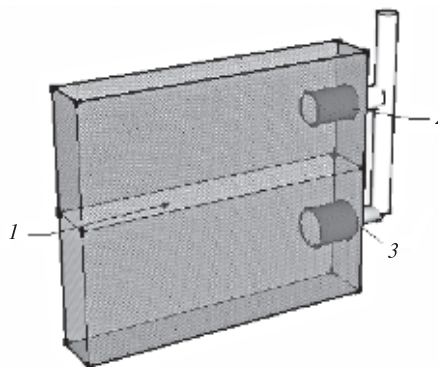


Рис. 1. Конструкция для ослабления теплового излучения:
1 — пеноудерживающая полка (диафрагма);
2, 3 — пеногенератор

этом были смоделированы условия реального пожара. Длительность испытаний определялась временем разрушения в конструкции 50 % объема пены. В ходе испытаний установлено, что данная конструкция способна эффективно препятствовать тепловому потоку в течении 5–7 минут (затем требуется повторное заполнение конструкции пеной).

При экспериментальной работе с СМЛ определено, что величина перфорации плоскостей из стекломатного листа существенно не влияет на время устойчивости пены в данной конструкции. Общая площадь перфорации на данной плоскости из стекломатного листа составляет 10 %; поэтому пена здесь удерживается дольше, чем в конструкции с плоскостью из металлической сетки. Результаты огневых испытаний показали, что конструкция из СМЛ, заполненная воздушно-механической пеной средней кратности, способна на 100 % поглощать тепловое излучение и препятствовать тепловому потоку в течении 12 минут. При заполнении данной конструкции пеной высокой кратности время ее термического сопротивления увеличивается на 3,3 минуты, т. е. составляет 15,3 минуты.

Затем было проведено математическое моделирование, описывающее распространение тепла в конструкции, наполненной средой (воздушно-механическая пена) с изменяющимися теплофизическими характеристиками. Для этого использовалось уравнение (1)

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T,\tau) \frac{\partial T(x,\tau)}{\partial x} \right) -$$

$$-q(x)T(x, \tau) + f(x, \tau), \quad (1)$$

где $c(T)$ — теплоемкость проводящей среды, $\text{м}^2/(\text{сек}^2 \cdot \text{град})$; $\lambda(T)$ — теплопроводность проводящей среды, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$; $\rho(T)$ — удельная плотность среды, $\text{кг}/\text{м}^3$; $f(x, \tau)$ — функция источников тепла внутри тела; $q(x)$ — функция источников или стоков тепла внутри тела пропорциональных разности температур.

Ввиду того, что теплофизические характеристики пены менялись как во времени, так и в пространстве, получить аналитическое решение уравнения (1) оказалось затруднительным. Для решения этого уравнения использовался численный подход, основанный на методе конечных разностей. Температуру в каждой точке отрезка для заданного момента времени определяли решением системы линейных уравнений относительно неизвестных значений температуры в узлах разбиения отрезка. Затем проверили работу алгоритма на решении тестовой задачи, основанной на уравнении теплопроводности

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T, \tau) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right) + f(x, \tau). \quad (2)$$

Решение искали на отрезке $x = [0, 1]$ и по времени $\tau = [0, 10]$. Коэффициент теплопроводности выбирали в виде функции от времени; при этом на левой границе задано условие Дирихле (температура фиксирована), на правой — Неймана (имеется теплообмен с поверхностью). С увеличением числа интервалов разбиения отрезка в четыре раза ошибка уменьшилась практически в 10 раз.

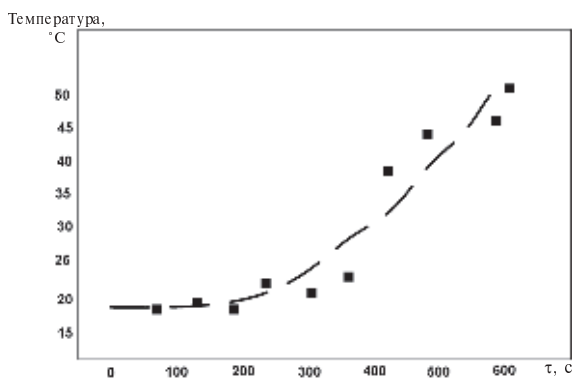


Рис. 2. Зависимости температуры от времени на обратной стороне конструкции из металлических сеток
(■ — экспериментальные данные; — — — — расчетные)

На следующем этапе оценивали удельную теплоемкость и коэффициент теплопроводности для пены заданной кратности. Временную зависимость этих величин считали известной из результатов эксперимента. Дополнительно рассчитывалось временное изменение температуры на внутренней стенке ограждения при наличии пены. Причем отвод тепла от внутренней стенки осуществлялся за счет теплообмена с поверхности конструкций.

На рис. 2 приведен график рассчитанной зависимости температуры на внутренней стенке. Наблюдается достаточно хорошее согласие с учетом того, что часть характеристик для пены экстраполировалась линейным образом от теплофизических характеристик воздуха к теплофизическим характеристикам воды. В качестве параметра для используемых теплофизических характеристик пены использовалось число ее кратности.

Коэффициент поверхностного теплообмена принят равным $\alpha = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$, т. е. типичному значению для металлических поверхностей в отсутствие сильной конвекции. Коэффициент теплопроводности пены принят равным $\lambda = 0,6 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$. Его значение обусловлено лишь теплопроводностью водяной пленки в пене. Воздух в пузырьках пены имеет коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,023 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$, т. е. в 30 раз меньше соответствующего значения для воды. Поэтому теплопроводностью за счет воздуха в данном случае пренебрегали. Для числа кратности пены 160 рассчитанное значение плотности пены составило $7,55 \text{ кг}/\text{м}^3$. В расчетах

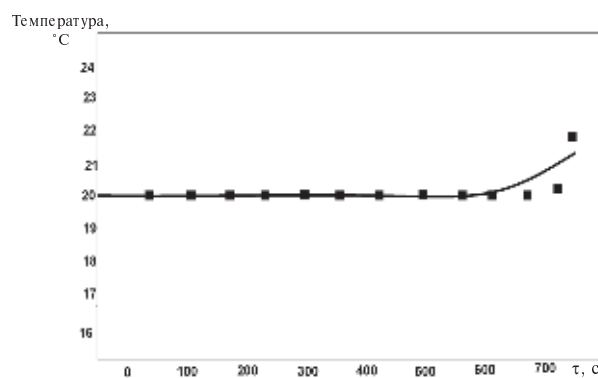


Рис. 3. Зависимости температуры от времени на обратной стороне конструкции из стекломанитового листа
(■ — экспериментальные данные; — — — — расчетные)



Таблица 2

Краткая сравнительная характеристика конструкций

Показатель	Конструкция из металлических сеток	Конструкция из СМЛ
Время устойчивости пены при воздействии температуры, мин	5	15
Требуемое количество пенообразователя для заполнения 1 м ³ пеной, л	0,4	0,4
Число заново подаваемых порций пены*	12	5
Общее количество пенообразователя*, л	4,8	2
Стоимость, руб/м ³	1600	370

Число заново подаваемых порций пены и общее количество пенообразователя рассчитывалось при условии воздействия температуры на конструкцию 1 м³ в течение 60 мин.

предполагалось, что значение удельной теплоемкости напрямую связано с плотностью пены и, значит, с числом кратности. Если принять линейный вариант изменения удельной теплоемкости проводящей среды и считать, что максимальная кратность пены составляет 400, то при таком значении кратности пена практически состоит из воздуха и вклад в удельную теплоемкость проводящей среды от воды практически равен нулю. Таким образом, теплофизические характеристики пены зависят от числа ее кратности. Приведенный пример расчета (рис. 2) основан на использовании предположенных закономерностей.

Для расчета ограждающей конструкции, в которой в качестве стенок применяется стекломagneвый лист, использовались следующие теплофизические характеристики составной среды. Значение теплопроводности для стекломagneвого материала принималось равным среднему значению, которое находится в интервале $\lambda_{st} = 0,8-0,21$ Вт/(м·град), теплопроводность воздушно-механической пены обусловлена лишь теплопроводностью водяной пленки. Плотность же стекломagneвого листа принята равной $\rho_{st} = 1000$ кг/м³. Плотность пенного заполнителя обусловлена числом кратности. Удельная теплоемкость стекломagneвого листа принята равной $c = 800$ Дж/(кг·град), а теплоемкость пены определялась числом ее кратности. На рис. 3 представлены временная зависимость температуры на внешней стенке ограждения, заполненного пеной средней кратности, и набор экспериментальных точек.

Численные расчеты конструкции из стекломagneвого листа показывают: основное падение температуры происходит в пенном слое на расстоянии 20–30 см, что позволяет заметным образом сократить расход пены, так как остальная часть ограждающей конструкции работает в низком интервале перепада температур.

Таким образом, в процессе теплофизического расчета определено время термического сопротивления исследуемых устройств, а также зависимость плотности, теплоемкости и теплопроводности пены абсолютные величины этих характеристик увязываются с кратностью пены.

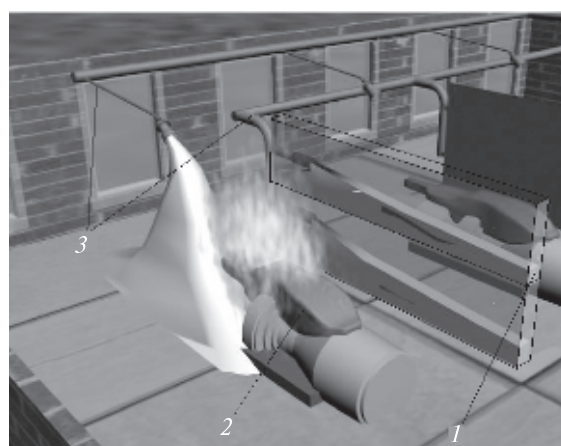


Рис. 4. Использование конструкций для предотвращения распространения пожара в производственных зданиях:

1 — конструкция ограничивающая распространение пожара; 2 — горящий агрегат; 3 — система пенного пожаротушения

В таблице представлена краткая сравнительная характеристика двух разработанных конструкций, предназначенных для поглощения теплового излучения при пожарах.

Разработанные конструкции способны поглощать тепловое излучение при пожарах. На рис. 4 показан пример использования разработанных конструкций для предотвращения распространения пожара в производственных зданиях.

Однако при использовании конструкций, выполненных из металлических сеток, потребуется большее количество пенообразователя. Кроме того, в конструкцию из стекломagneвного листа можно подавать воздушно-механическую пену высокой кратности. В связи с этим для защиты технологического оборудования от теплового излучения при возникновении пожара рекомендуется использовать конструкции, выполненные из перфорированного стекломagneвного листа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2247584 РФ, МПК7 А62С2/08. Способ создания противопожарной завесы и экранирующие устройство [Текст] / Н.Н. Брушлинский, Е.А. Серебренников, Н.П. Копылов [и др.]; заявитель и патентообладатель Всерос. науч.-исслед. ин-т противопожарной обороны МВД России.— № 2002135802/12; заявл. 2002.12.30; опубл. 2005.03.10.

2. Пат. 2182025 РФ, МПК7 А62С2/08. Огнезащитное ограждение [Текст] / М.Х. Усманов, Н.Н. Брушлинский, Ю.У. Касымов [и др.]; заявитель и патентообладатель М.Х. Усманов.— № 2000105810/12; заявл. 2000.03.13; опубл. 2002.05.10.

3. Пат. 2182024 РФ, МПК7 А62С2/08, А62С35/68. Способ ослабления потока энергии в виде света, тепла и конвективных газовых потоков и устройство к лафетному стволу для создания защитного

экрана от потока энергии в виде света, тепла и конвективных газовых потоков [Текст] / М.Х. Усманов, Н.Н. Брушлинский, Р.А. Аблязис [и др.]; заявители и патентообладатели М.Х. Усманов, Н.Н. Брушлинский, Р.А. Аблязис [и др.].— № 2000105809/12; заявл. 2000.03.13; опубл. 2002.05.10.

4. Пат. 2156628 РФ, МПК7 А62С2/08. Способ создания противопожарной завесы [Текст] / М.Х. Усманов, Н.П. Копылов, Е.А. Серебренников [и др.]; заявитель и патентообладатель Всерос. науч.-исслед. ин-т противопожарной обороны МВД России.— № 99114862/12; заявл. 1999.07.07; опубл. 2000.09.27.

5. ГОСТ 25380-82. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции [Текст].— Введ. 1983-01-01.— М.: Издательство стандартов, 1988, 12 с.

УДК 620.178.746.22:669.001.5

А.И. Рудской, Н.Г. Колбасников,
О.Г. Зотов, А.А. Лукьянов

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ: ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ

Комплексу свойств металлов, в том числе при ударных нагрузках, уделяется большое внимание. Если механические свойства и параметры структуры, формирующиеся при горячей прокатке сталей, могут быть спрогнозированы при помощи компьютерных программ, например *Hot Strip Mill Model*, разработанной американской фирмой *Integ Prosess Group, Inc.*, то для расчета ударных свойств подобных программ не существует. Это, возможно, обусловлено тем, что общепринятой теории, количественно описывающей изменение ударной вязкости сталей в зависимости от условий обработки или эксплуатации, пока не существует.

Известно, что температурная зависимость ударной вязкости существенно отличается от зависимости других свойств металлов — прочностных (σ_T , σ_B) и пластических (δ , ψ). Ударная вязкость — очень «капризная» характеристика металла и зависит от многих факторов, в том числе от химического состава, структурного состояния, от изменения прочностных и пластических свойств, которые сами по себе определяются структурой. В связи с этим возникла идея при расчете ударной вязкости отталкиваться именно от структурного состояния материала заданного химического состава, которое с удовлетворительной точностью может быть рассчитано и количественно описано [1].

Концептуальная часть

Концепция теоретического подхода к решению задачи о температурной зависимости ударной вязкости основана на положениях работ [2, 3], в которых предложена методика описания

структуры металлов при помощи интегрально-вероятностной функции — статистической энтропии. Основные положения этого подхода состоят в следующем.

1. Структура металла представляет собой распределение по его объему внутренних напряжений, создаваемых дефектами кристаллического строения. В этом случае любой структуре металла можно поставить в соответствие именованное число, характеризующее меру беспорядка распределения этих напряжений, — структурную энтропию

$$\Delta S_{\text{стр}} = -R \int f(\sigma^*) \ln f(\sigma^*) d\sigma^*, \quad (1)$$

где $f(\sigma^*)$ — плотность распределения вероятностей безразмерных внутренних напряжений, которая может быть определена в опытах на растяжение.

2. Существует соотношение между пределом текучести s_T и структурной энтропией $\Delta S_{\text{стр}}$, которое задает взаимосвязь прочности металла (предел текучести) и его структуры при комнатной температуре:

$$\sigma \equiv \sigma_s = \frac{\rho T_0}{\mu} \Delta S_{\text{стр}}, \quad (2)$$

где ρ и μ — плотность и молярная масса материала.

3. Структурная энтропия, являясь аддитивной функцией, учитывает вклад отдельных структурных элементов:

$$\Delta S_{\text{стр}} = \Delta S_M + \Delta S_{\text{лег}} + \Delta S_{\text{фп}} + \Delta S_{\text{стр}}(\varepsilon) + \dots, \quad (3)$$

где ΔS_M — структурная энтропия матричного материала; $\Delta S_{\text{лег}}$ — учитывает вклад легирова-

ния; $\Delta S_{\text{фп}}$ — вклад фазовых (полиморфных) превращений; $\Delta S_{\text{стр}}(\varepsilon)$ — вклад пластической деформации.

4. Температурное изменение структурной энтропии определяет изменение предела текучести металла согласно формуле

$$\sigma_T(T) = \frac{\rho T_0}{\mu} \Delta S_{\text{стр}}(T), \quad (4)$$

или через температурное изменение модуля упругости

$$\frac{\Delta S_{\text{стр}}}{\Delta S_{\text{стр}0}} = \frac{\sigma_{Ti}}{\sigma_{T0}} = \left(\frac{E_i}{E_0} \right)^{\frac{1}{1-\beta}}, \quad (5)$$

где индекс « i » принадлежит температуре, отличной от комнатной (для последней принят индекс «0»).

5. Для идентификации вероятностной функции $f(s^*)$ используются обобщенная реологическая модель упругопластической среды с упрочнением Ишлинского и опыты на растяжение при температурно-скоростных параметрах, обеспечивающих отсутствие релаксационных процессов:

$$f(\sigma^*) = -\frac{1+h}{E} \frac{d^2 \sigma}{d\varepsilon^2}, \quad (6)$$

где h — параметр упрочнения; $\sigma(\varepsilon)$ — зависимость истинных напряжений от степени деформации, например при растяжении.

6. Между пределом текучести металла и пластичностью для большинства металлов существует взаимосвязь в виде соотношения

$$\delta_i = \delta_0 \frac{\sigma_{T0}}{\sigma_{Ti}}, \quad (7)$$

или с учетом температурной зависимости пределов текучести (5)

$$\delta_i = \delta_0 \left(\frac{E_i}{E_0} \right)^{\frac{1}{\beta-1}}, \quad (8)$$

где индекс «0» принадлежит комнатной температуре, а индекс « i » — к любым другим. Соотношения (7), (8) связывают пластичность и предел текучести металла и согласно [2, 3] справедливы не только для предельных деформаций, но и для любой точки плотности распределения вероятности $f(\sigma^*)$.

Таким образом, выполнив опыты на растяжение при комнатной температуре, мы можем

судить об изменении пластичности при другой температуре, если известно изменение предела текучести.

Температурная зависимость предельных деформаций

К настоящему моменту неизвестно, какую величину предельных деформаций следует принимать при конечно-элементном моделировании ударной вязкости в качестве критерия разрушения — относительное удлинение δ , относительное сужение в шейке ψ , либо какую-то другую характеристику. Отметим, что при использовании метода конечных элементов, в частности, пакета ANSYS, в качестве критерия разрушения удобнее использовать предельные деформации, а не напряжения. Очевидно, что относительное сужение в шейке, выраженное в логарифмических деформациях, является наиболее близкой величиной предельных деформаций. Заметим, что относительное удлинение при растяжении связано с потерей устойчивости пластической деформации — образованием локального утонения в виде шейки — и не определяет начало разрушения металла.

В качестве примера исследуем температурную зависимость предельной деформации для стали 30. Полученные при растяжении образцов зависимости силы от удлинения — $P(\Delta l)$ — были обработаны по стандартной методике и дали зависимости истинных напряжений от истинных деформаций в виде

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_{T0} + \alpha \varepsilon^\beta = 280 + 700 \varepsilon^{0.6}. \quad (9)$$

Если считать, что в момент разрушения в металле действуют напряжения $\sigma(\varepsilon) \equiv \sigma_p$ при истинных деформациях $\varepsilon \equiv \varepsilon_{\text{пред}}$, то предельные деформации можно вычислить при помощи соотношения

$$\varepsilon_{\text{пред}} = \left(\frac{\sigma_p - \sigma_{T0}}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}}, \quad (10)$$

или, учитывая температурные зависимости предела текучести и напряжений, соответствующие моменту разрушения σ_p из [2, 3],

$$\varepsilon_{\text{пред}}(T) = \left(\frac{\sigma_p(T) - \sigma_{T0}(T)}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} =$$

$$= \left[\frac{\sigma_{p0} \frac{E_i}{E_0} - \sigma_{T0} \left(\frac{E_i}{E_0} \right)^{\frac{1}{1-\beta}}}{\alpha} \right]^{\frac{1}{\beta}}. \quad (11)$$

Зависимость модуля упругости от температуры, соответствующая данным [3], представлена в табл. 1. Выполним расчет влияния параметров аппроксимации (9) на значение предельных деформаций согласно выражению (11). Исследуем влияние следующих факторов: напряжений σ_p , характеризующих момент разрушения; предела текучести σ_{T0} ; параметров аппроксимации зависимости (10) α и β , описывающих характер деформационного упрочнения стали.

Зависимость предельных деформаций от температуры представим в виде зависимости от значения относительного модуля упругости E_i/E_0 . Результаты расчетов представлены в виде графиков на рис. 1. При исследовании каждого из факторов считалось, что остальные имеют значения такие, как в (9).

Как видно по рис. 1, а, увеличение значения параметра аппроксимации α , определяющую величину упрочнения при $\varepsilon = 1$, приводит к снижению предельной деформации во всем интервале температур и при различных значениях барьера разрушения σ_p (см. рис. 1, б). Увеличение σ_p , как и ожидалось, приводит к значительному возрастанию предельных деформаций $\varepsilon_{пред}$ и смещению их максимума в область низких температур (см. рис. 1, б, ж). Повышение предела текучести σ_T (рис. 1, в) вызывает понижение предельных деформаций и смещение их максимума в сторону более высоких температур. Увеличение показателя β в аппроксимации (9) вызывает значительное возрастание предельных деформаций.

На рис. 1, д представлены зависимости предельной деформации $\varepsilon_{пред}$ от значения относительного модуля упругости при изменении предела текучести (на графиках указаны приблизительные значения деформаций, соответствующих переходу металла в квазихрупкое состояние). По этим данным перехода в хрупкое состояние в зависимости от значений предела текучести построена зависимость, представленная на рис. 1, е.

Таблица 1

Температурное изменение модуля упругости стали 17Г1СУ

$T, ^\circ\text{C}$	$E, \text{ГПа}$	E_i/E_0
20	211	1
0	213	1,0095
–20	214,7	1,0175
–40	216,6	1,0265
–60	219,4	1,040
–70	220,8	1,0465

Результаты на рис. 1 — лишь качественные, но подтверждают известные из литературных данных зависимости ударной вязкости от температуры и перечисленных факторов.

При помощи конечно-элементной программы ANSYS/LS DYNA получено решение задачи об ударной вязкости при комнатной температуре с учетом влияния механических свойств и структурного состояния металла [4], которое показало хорошие качественные результаты. Анализ влияния температуры испытания на изменение ударной вязкости, выполненный для образцов с V- и U-образными надрезами при помощи разработанной программы, показал, что поведение стали 30 при понижении температуры идентично известному из справочников, например [5]. По результатам предварительного исследования был сделан вывод о возможностях применения как программы для расчетов, так и общего подхода для описания ударной вязкости.

Однако дальнейшие попытки расчета температурной зависимости ударной вязкости (УВ), выполненные для полос из сталей 17Г1С-У, 09Г2С, 12ГСБ, Х65 после аппроксимации кривой растяжения зависимостями (9), показали монотонное возрастание значений УВ при снижении температуры испытаний до -60°C , что полностью опровергалось экспериментальными данными. При анализе причин расхождения данных экспериментов и разработанного теоретического подхода была рассмотрена корреляция между температурным изменением УВ и основными характеристиками свойств металла: $\sigma_{0,02}$, $\sigma_{0,2}$, σ_B , δ , $\delta_{равн}$, ψ . Установлено, что пропорциональная зависимость существует только между УВ и сужением в шейке ψ . На рис. 2, а представлены

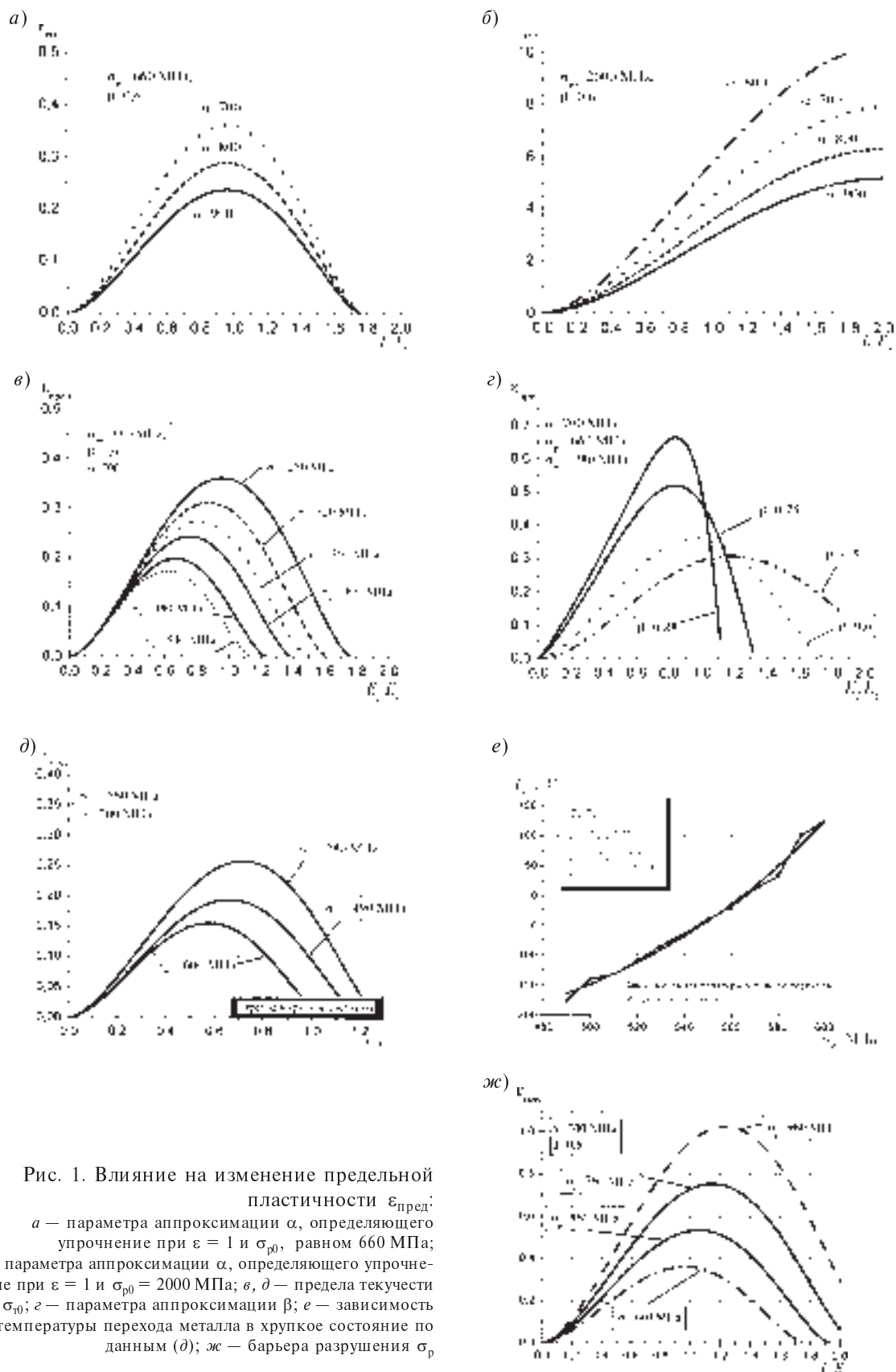


Рис. 1. Влияние на изменение предельной пластичности $\epsilon_{пред}$:
 а — параметра аппроксимации α , определяющего упрочнение при $\epsilon = 1$ и σ_{p0} , равном 660 МПа;
 б — параметра аппроксимации α , определяющего упрочнение при $\epsilon = 1$ и $\sigma_{p0} = 2000$ МПа; в, д — предела текучести σ_{p0} ; е — параметра аппроксимации β ; е — зависимость температуры перехода металла в хрупкое состояние по данным (д); ж — барьера разрушения σ_p

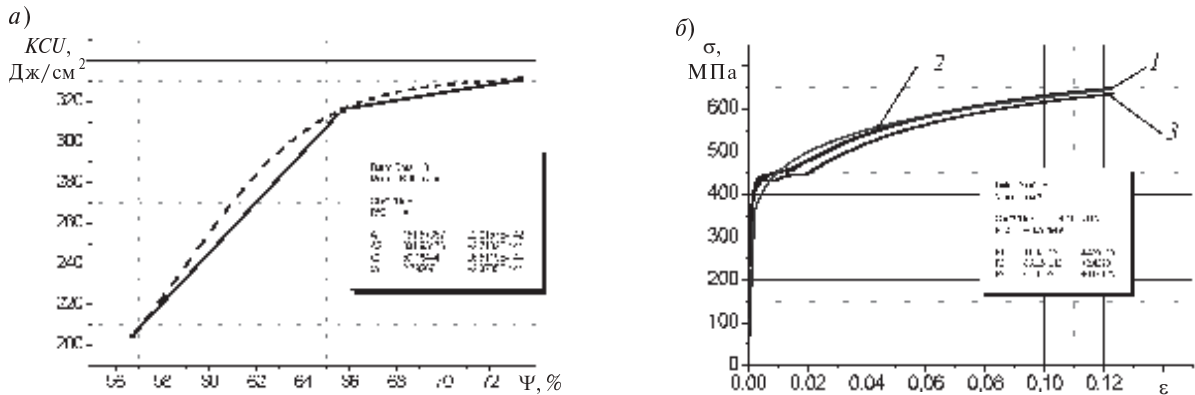


Рис. 2. Зависимость ударной вязкости от сужения в шейке образца ψ (а); зависимости истинных напряжений от истинных деформаций при испытаниях на растяжение для образцов из стали 17Г1С (1)–(3) и их аппроксимация по формуле (9) (б)

данные по 9 испытанным образцам из стали 17Г1С-У. Точки на графике представляют собой средние значения для партии из трех полос. Аппроксимации кривых «истинное напряжение — истинная деформация» для трех образцов из той же стали представлена на рис. 3, б.

При анализе кривых истинных напряжений, экстраполированных в область больших деформаций, и сравнения их со значениями напряжений σ_p , действующими в шейке перед разрушением при истинных деформациях $\epsilon = -\ln(1 - \psi)$, было установлено, что при больших деформациях (после образования шейки) истинные напряжения не соответствуют аппроксимации $\sigma(\epsilon) = \sigma_{T0} + \alpha\epsilon^\beta$, действительной до образования шейки (см. рис. 3). Установлено, что при больших деформациях коэффициент β изменяется до значений $\beta_1 = 0,78 - 0,92$, при этом зависимость $\sigma(\epsilon)$ хорошо аппроксимируется функцией

$$\sigma(\epsilon) = \sigma_{T0} + \alpha\epsilon^{\beta_1}. \quad (12)$$

Изменение вида кривой с ростом деформации означает изменение интенсивности деформационного упрочнения, связанное, очевидно, со сменой механизма деформации и добавлением ротационного механизма к первоначальному дислокационному. Общее реологическое уравнение металла при испытаниях на растяжение, включающее участок малых деформаций до образования шейки, а также сужение в шейке можно описать функцией

$$\sigma(\epsilon) = \sigma_{T0} + \alpha\epsilon^{\beta(1+\epsilon)}, \quad (13)$$

представленной на рис. 4.

Поскольку для низко- и среднелегированных сталей при испытаниях на ударный изгиб разру-

шению образца предшествует значительная пластическая деформация, можно считать, что непосредственно перед разрушением металл имеет реологические свойства, характерные именно для больших деформаций. Например, если для стали 17Г1С-У при малых деформациях до образования шейки реологическое уравнение имеет вид $\sigma(\epsilon) = 213 + 612\epsilon^{0,2}$, то непосредственно перед разрушением — $\sigma(\epsilon) = 430 + 740\epsilon^{0,88}$.

Предполагая, что предельная деформация при испытаниях на ударную вязкость пропорциональна предельным деформациям при растяжении, температурную зависимость $\epsilon_{\text{пред}}$ для ударной вязкости следует рассчитывать при помощи соотношения (11), но с учетом изменяемо-

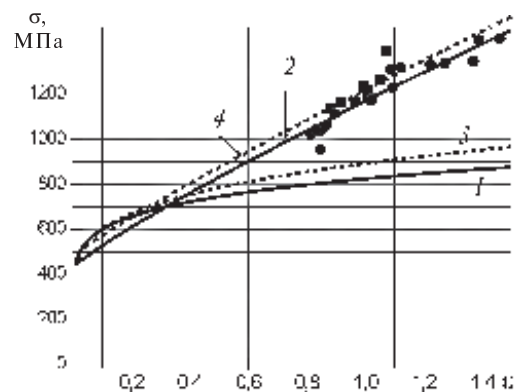


Рис. 3. Аппроксимации по формуле (9) зависимостей истинных напряжений от деформации для сталей 17Г1С-У (1) и X65 (2), экстраполированные в область больших деформаций, и по формуле (12) для тех же сталей (3, 4). Экспериментальные точки даны в виде кругов для стали 17Г1С-У и в виде квадратов — для стали X65

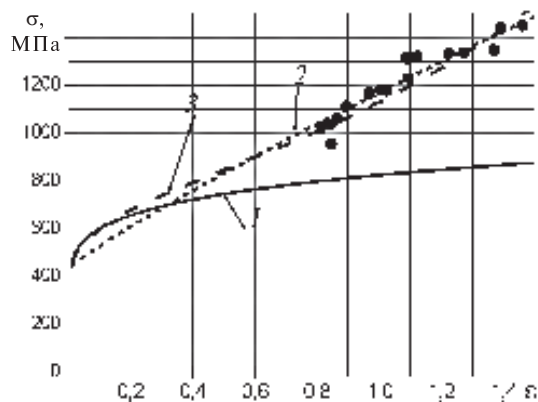


Рис. 4. Аппроксимации зависимостей истинных напряжений от деформаций для стали 17Г1С-У:

- 1 — $\sigma(\epsilon) = 213 + 612\epsilon^{0,2}$ — для малых деформаций;
 2 — $\sigma(\epsilon) = 430 + 740\epsilon^{0,88}$ — для больших деформаций;
 3 — $\sigma(\epsilon) = 380 + 750\epsilon^{0,5(1+0,75\epsilon)}$ — для всего диапазона деформаций

го коэффициента $\beta \rightarrow \beta_1$, характерного для больших деформаций.

Для случая больших ($\approx 0,85-0,9$) значений β_1 зависимость предельных деформаций, представленная на рис. 1, г, отличается резким падением

при понижении температуры. В связи с этим становятся вполне объяснимыми значительные скачки и разбросы значений ударной вязкости, зачастую даже в пределах одной прокатанной полосы для структурно неоднородного состояния: действительно, поскольку параметры аппроксимации β и β_1 являются структурно чувствительными величинами, то небольшие их изменения могут привести к сильным изменениям УВ. Например, при изменении β_1 от 0,8 до 0,9 для различных участков полосы (предположим, за счет ликвационных зон и полосчатости структуры) при температуре -60°C ($E_i/E_0 = 1,04$) различие предельных деформаций составляет 2,7 раза.

Для сравнения расчетных и фактических данных по температурной зависимости ударной вязкости были отобраны полосы из нескольких сталей, прокатанных по существующей технологии на стане 2000 ЧерМК ОАО «Северсталь». Из них были изготовлены образцы для определения ударной вязкости, которые испытывали при температурах 20, -20 , -40 , -60°C .

Для каждой температуры результаты усреднены по 3–4 полосам из одной партии проката.

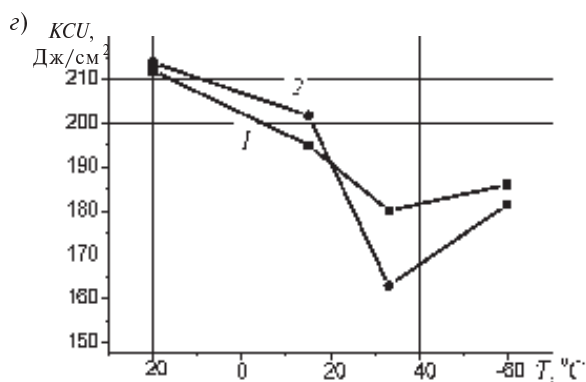
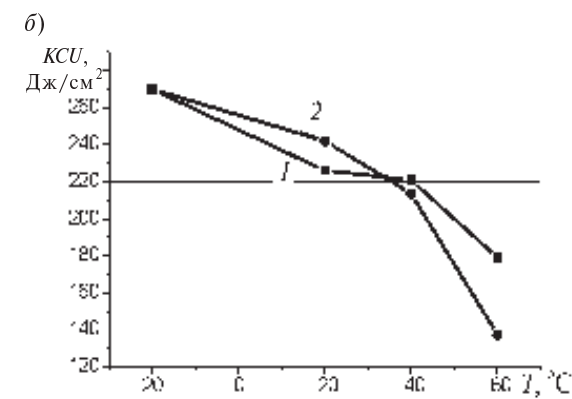
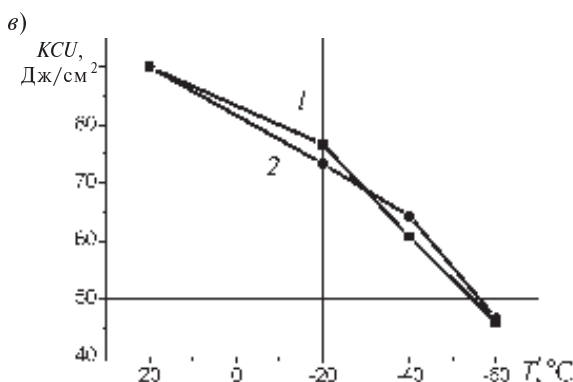
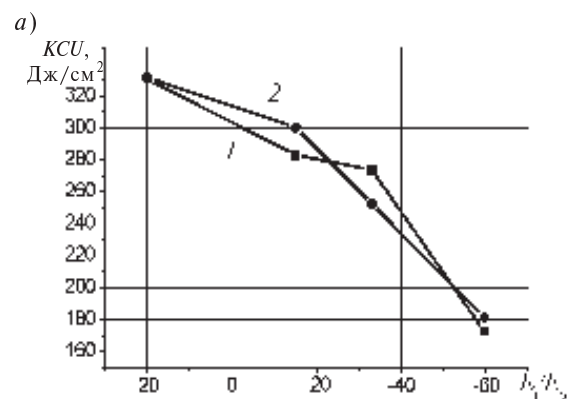


Рис. 5. Экспериментальные (1) и расчетные (2) температурные зависимости ударной вязкости для сталей 17Г1С-У (а), X65 (б), 09Г2С (в), 12ГСБ (г)



Как видно, качественно и количественно расчетные зависимости на рис. 5 вполне удовлетворительно описывают экспериментальные точки. Представленные функции построены с учетом известной для комнатной температуры ударной вязкости KCU_0 .

Таким образом, для реализации компьютерной программы расчета температурной зависимости ударной вязкости необходима информация об изменении коэффициента аппроксимации β при разных от степенях деформации в испытаниях на ударную вязкость.

Для изучения зависимости ударной вязкости от величины предельных деформаций был проведен компьютерный эксперимент. По известной из опытов температурной зависимости УВ для каждой из исследованных температур подбирались такие значения предельной деформации, которые обеспечивали наилучшую сходимость расчетных и фактических значений KCU_i . Результаты этого эксперимента представлены на рис. 6.

Как видим, эта зависимость имеет практически линейный характер. Учитывая этот факт, температурное изменение УВ можно приближенно рассчитывать при помощи соотношения, полученного из (8):

$$KCU_i = KCU_0 \left(\frac{E_i}{E_0} \right)^{\frac{1}{\beta_1 - 1}}. \quad (14)$$

Результаты выполненной работы сводятся к следующему:

Сформулирована концепция, позволяющая рассчитывать изменения свойств материалов при пластической деформации и изменении температуры. При помощи данной концепции удастся описать температурное изменение ударной вязкости для различных сталей, опираясь на известные значения для комнатной температуры.

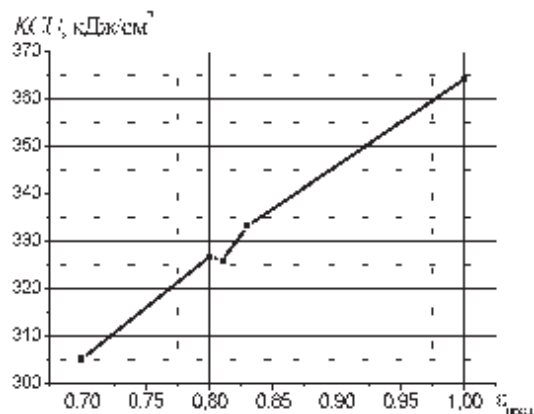


Рис. 6. Зависимость ударной вязкости от величины предельной деформации

При пластической деформации, в том числе при ударных испытаниях происходят изменения структуры и механизмов пластической деформации, которые приводят к изменению реологического уравнения металла. При этом температурные зависимости изменения свойств деформированного и отожженного металла существенно отличаются друг от друга. Температурная зависимость холоднодеформированного металла, в том числе в области низких температур, становится значительно более сильной. Это является основной причиной значительно более резкого снижения предельных деформаций по сравнению, например, с удлинением горячекатаного или отожженного металла.

Зависимость ударной вязкости от величины предельных деформаций имеет практически линейный характер.

Для предварительной оценки величины ударной вязкости необходимо иметь значение KCU для исходной (например, комнатной) температуры и значение коэффициента аппроксимации кривой истинных напряжений β_1 для деформированного состояния. Коэффициент β_1 для каждой марки стали должен быть определен экспериментально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колбасников, Н.Г. Внедрение компьютерной программы Hot Strip Mill Model (HSM) в прокатное производство для управления структурой и свойствами сталей [Текст] / Н.Г. Колбасников, А.И. Рудской, А.А. Немтинов [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2007. № 3.— С. 38–47.
2. Колбасников, Н.Г. Теория обработки метал-

лов давлением. Сопротивление деформации и пластичность металлов [Текст] / Н.Г. Колбасников.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2000.— 320 с.

3. Колбасников, Н.Г. Энтропия. Структура. Фазовые превращения и свойства металлов [Текст] / Н.Г. Колбасников, С.Ю. Кондратьев.— СПб.: Наука, 2006.— 360 с.
4. Колбасников, Н.Г. Компьютерное модели-

рование испытаний на ударную вязкость. Современные технологии производства транспортного металла [Текст] / Н.Г. Колбасников, Боровков А.И., Рудской [и др.].— Екатеринбург: Изд. ОАО «Нижнетагильский металлургический комбинат»,

УГТУ-УПИ, 2008.— С. 352—357.

5. Марочник сталей и сплавов. [Текст] / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин [и др.] / Под общ. редакцией В.Г. Сорокина.— М.: Машиностроение, 1989.— 640 с.

УДК 004.89:004.045

*Н.А. Грязнов, В.В. Кириченко,
Д.А. Кочкарев, А.В. Лопота*

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ СЕНСОРНЫХ СРЕДСТВ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПЛАТФОРМЫ И ОБЪЕКТА

Проблема эффективного извлечения полезной информации при большом объеме потока данных с датчиковой аппаратуры

Прогресс в области создания электронных компонент и вычислительных средств существенно расширил возможности автономного функционирования устройств различного назначения, в том числе решающих и транспортно-манипуляционные задачи. Многие десятилетия стремления разработчиков были направлены на увеличение скорости и объемов сбора информации с внешних датчиков. Как следствие, увеличение размерности и частоты опроса матричных приемников привели к тому, что одним из ключевых факторов, сдерживающих развитие робототехники несмотря на возросшие возможности вычислительной техники, стали системы обработки информации.

При увеличении числа элементов оптической приемной матрицы по одной из координат N общее количество ее элементов возрастает пропорционально квадрату N^2 указанного числа. Размерность же нейронной сети, которая была бы способна переработать возросший объем информации без потерь в эффективности, увеличивается практически пропорционально четвертой степени N^4 выбранного параметра. Такой вывод следует из естественного предположения, что количество выходов сети увеличивается в той же мере, что и количество входов. В противном случае повышение разрешения технически нецелесообразно, поскольку

ку не приводит к увеличению объема извлекаемой полезной информации.

Вопрос практического применения нейронных сетей пока даже не связан со сложностью их разработки, создания, настройки или обучения. В силу особенностей современной компьютерной техники задача эффективного извлечения полезной информации с помощью бионического подхода находится на стадии теоретических, поисковых изысканий. Вместе с тем среди требований, предъявляемых к современным робототехническим средствам, функционирование в режиме реального времени является одним из определяющих.

Ориентация в пространстве и распознавание образов

В силу физической природы электромагнитного излучения наибольшие объемы сведений об окружающей обстановке могут быть получены в оптическом и инфракрасном спектральных диапазонах. Неудивительно, что 90—95 % данных с внешних рецепторов наиболее развитые представители животного мира собирают визуально посредством полнообзорных (как у птиц и рыб) или бинокулярных (у млекопитающих) органов зрения. Их современное техническое воплощение в виде цифровых телевизионных камер обеспечивает сбор спектральной и координатно-угловой информации. Для ориентации в пространстве за счет восстановления трехмерного изображения окружающей среды необходимо получить сведения о дальности до внешних объектов.



Стереометрические телевизионные методы не требуют затрат на дополнительное освещение в дневных условиях и обладают хорошим быстродействием, но имеют значительную погрешность измерения расстояния. Самым же серьезным их недостатком с позиций автоматических вычислений является сложность однозначной идентификации общих точек в двух изображениях сцены с различных ракурсов. Тем не менее эволюция органов зрения в живой природе привела к бинокулярному устройству глаз в ущерб максимальному охвату зоны наблюдения (поле зрения человека раз в пять уступает полю зрения птиц).

Анализ функций стереоскопического зрения показывает, что определение расстояний до объектов — не единственная и даже, скорее всего, не самая главная задача пары органов зрения особи. Стереозрение как бионический подход к решению проблемы автономной навигации в ближней зоне имеет свои ограничения, связанные с отличием современной вычислительной техники от биологических нейронных сетей человека и других высших животных [1].

На рис. 1 приведена условная блок-схема функционирования биологической сенсорно-координатной системы, обеспечивающей организм входящей информацией об окружающей обстановке. Ключевые задачи данной системы — векторизация графической информации (декомпозиция изображения на объекты) и идентификация объектов (распознавание образов).

В живых организмах обе задачи решаются практически параллельно одной и той же нейронной сетью, что для технических устройств в силу последовательности процессорных вычислений крайне неэффективно. Качественная оценка расстояния за счет использования принципов триангуляции при поперечном разnose глаз менее 10 см эффективна на дистанциях не более 10–20 метров. Вместе с тем выделение объектов (оконтуривание за счет различий в изображении более удаленных предметов при наблюдении с разных ракурсов) осуществляется на расстояниях до 50–100 метров.

Как уже отмечено, современные технические нейронные сети пока не способны эффективно решать такие сложные задачи, как декомпозиция изображения на объекты, и вряд ли будут способны на это в ближайшем обозримом будущем. Другими словами, проблема создания специализированных систем дистанционного осязания (формометрия и рельефометрия) весьма актуальна при решении практических задач автономной робототехники.

Самыми прецизионными системами дистанционного осязания являются лазерные сканирующие дальномеры [2], однако их высокая сложность и стоимость препятствуют широкому применению в сервисной и персональной робототехнике. Большие массогабариты мешают оснащению автономных мобильных платформ, а наличие движущихся деталей сканаторов су-

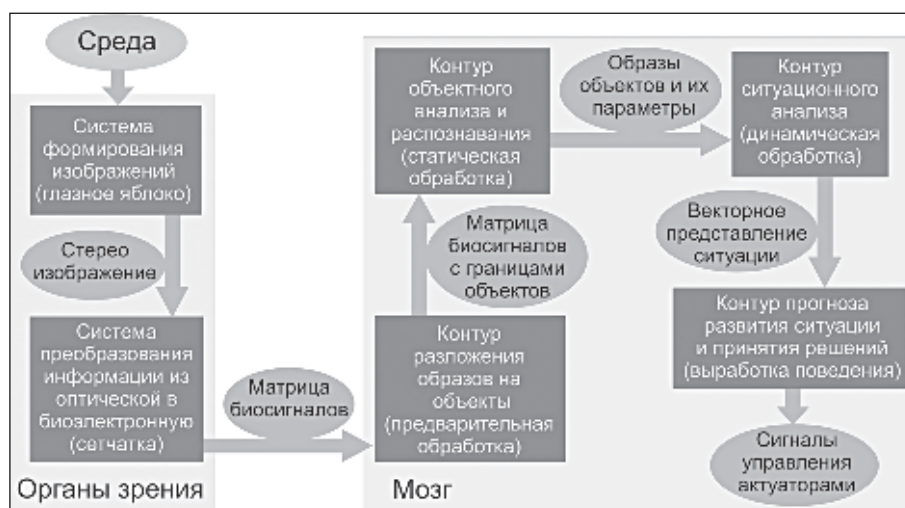


Рис. 1. Архитектура системы сбора и обработки координатной информации у человека и высших животных

существенно ограничивают условия и области использования.

Что касается стратегии подхода к решению проблемы сбора визуальной информации, наиболее перспективной представляется тенденция разделения задач векторизации и идентификации не только на алгоритмическом, но и на аппаратном уровне. С целью высвобождения ресурсов центрального процессора для решения задач функционального назначения, предварительную обработку по обоим каналам целесообразно вынести на отдельные процессоры, как это показано на рис. 2.

Автоматизация и роботизация любых динамических процессов, в частности функционирование автономных мобильных платформ и манипуляторов, базируются на эффективности сбора информации об окружающей среде. Системы технического зрения и дистанционного осязания обеспечивают самые высокие скорости информационных потоков, что особенно актуально в недетерминированных и экстремальных условиях.

Активные лазерно-телевизионные системы дистанционного осязания

Использование структурированной подсветки [3] позволяет перевести информацию о форме объекта и дальности до него в угловое распределение интенсивности, но внешнее освещение, в том числе и естественное, существенно осложняет практическое применение методов кодирования изображения светом. В работе [4] было

предложено использовать пространственно-временное структурирование лазерной подсветки в сочетании с двухкамерным стереозрением. Принципы функционирования лазерно-телевизионной системы дистанционного осязания проиллюстрированы на рис. 3.

Лазерный источник подсветки представляет собой несколько генераторов линии или один генератор с системой сканирования. Применение одиночной линии подсветки в этом случае обеспечивает снятие проблемы неоднозначности при выявлении сопряженных точек. Для освещения всей исследуемой рабочей зоны при таком подходе целесообразно использовать одномерное сканирование, а при работе с габаритными объектами известной формы — последовательное включение генераторов линий, как это продемонстрировано на рис. 3.

Отсутствие жесткой фиксации угла падения излучения подсветки при сканировании требует применения двух камер, жесткой синхронизации экспозиции, сбора и обработки двойного объема информации. Вариант с переключением излучателей предпочтителен в тех случаях, когда использование механического сканатора нецелесообразно по обстоятельствам функционирования, например в экстремальных условиях.

Предложенная схема использования двух пар камер позволяет реализовать алгоритм аппаратного разделения процессов технического зрения и дистанционного оптического осязания. Осевое совмещение цветной и монохроматической



Рис. 2. Архитектура системы сбора и обработки координатной информации автономного робототехнического комплекса

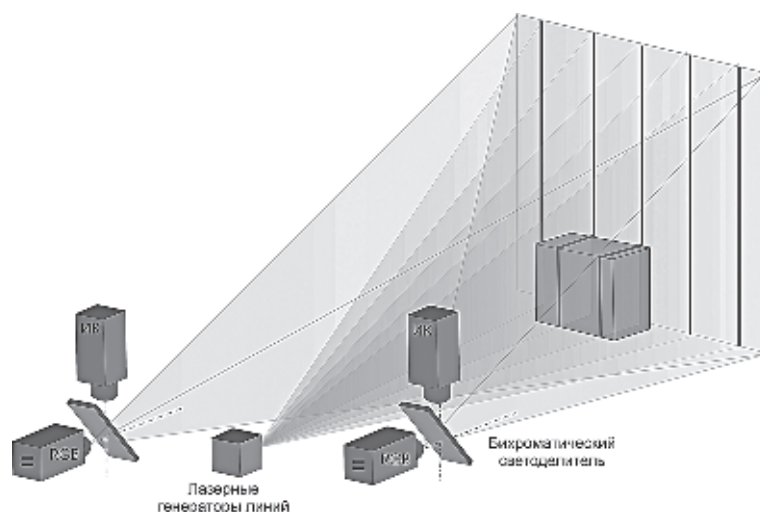


Рис. 3. Схема лазерно-телевизионной системы дистанционного осязания

камер при помощи бихроматического светоделивателя упрощает процедуру стыковки оптического изображения с системой оконтуривания объектов. Пластина светоделивателя практически без потерь пропускает излучение в видимом оптическом диапазоне и отражает основную часть излучения в ближнем инфракрасном диапазоне. Дополнительная спектральная селекция для подавления фоновой засветки в системе рельефометрии осуществляется при помощи абсорбционных светофильтров.

Простота интерпретации регистрируемого изображения определяется тем, что на границах объектов наблюдаются разрывы линий подсветки. Вычисление дальности при этом осуществляется по триангуляционным формулам [4] через определение положения центра тяжести линии. Алгоритм декомпозиции изображения на объекты при помощи системы дистанционного осязания приведен на рис. 4, а рабочее окно программы, осуществляющей практическую реализацию предложенного алгоритма в режиме отладки, — на рис. 5.

При наличии достаточного спектрального контраста объекта относительно фона дальнейший анализ динамики его удаленности можно вести даже при отсутствии излучения генераторов линий на объекте — по изменению его угловых габаритов. Другими словами, структурированная подсветка необходима для разрешения проблем неоднозначности выявления сопряженных точек в случае слабой текстурированности (контрастности) изображения в оптическом диапазоне.

Комплексирование сенсорных средств манипуляторов

Если в случае робототехнических мобильных платформ совмещение технического зрения и дистанционного осязания решает большинство проблем информационного обеспечения, то процедуры манипулирования объектами требуют дополнительного оснащения. В первую очередь это касается тактильных и силомоментных датчиков, необходимых для осуществления процедуры захвата, одновременно бережной и надежной.

Системы технического зрения и дистанционного осязания используются для расчета и реализации траектории приближения захватного устройства манипулятора к объекту воздействия. При этом, как и в живой природе, одна из камер выбирается в качестве опорной, вторая (а при использовании двух пар — также третья и четвертая) является вспомогательной. Все расчеты осуществляются в системе координат опорной камеры.

Применение разнесенных приемников излучения позволяет не только увеличить точность определения дальности, но и снизить эффект экранирования объекта воздействия манипулятором за счет использования двух ракурсов. При правильной организации процесса захватное устройство манипулятора целесообразно заводить со стороны, противоположной камерам, в первую очередь таким образом, чтобы как можно дольше не заслонять изображение объекта на опорной камере.

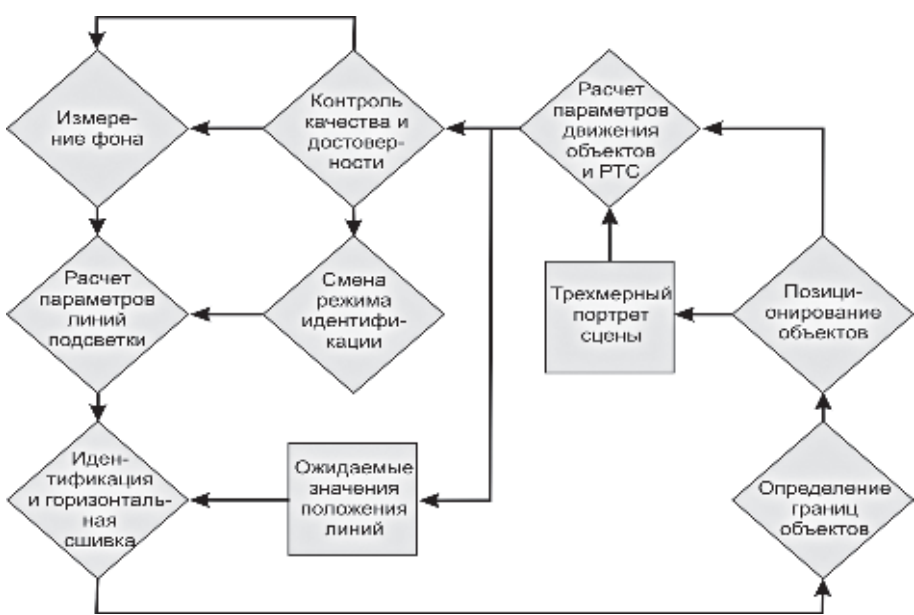


Рис. 4. Алгоритм функционирования системы дистанционного осязания

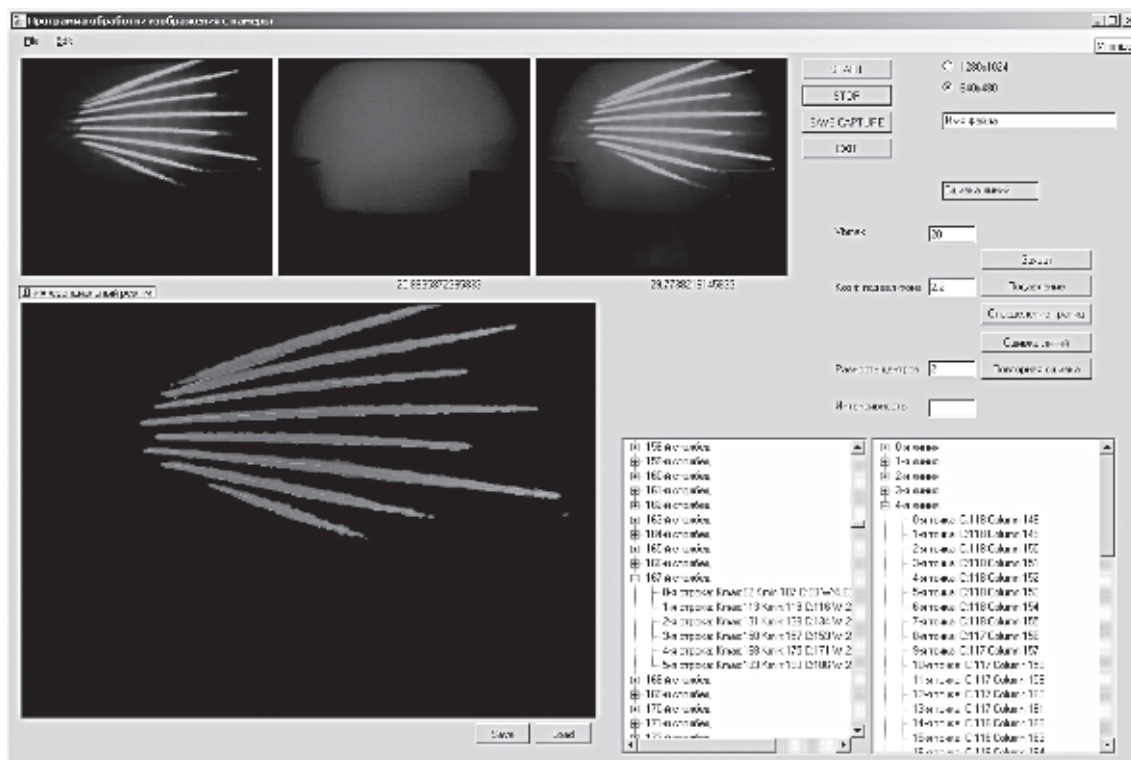


Рис. 5. Рабочее окно программы реализации алгоритма



Тактильные датчики используются для коррекции последнего участка дистанции с целью равномерного охвата объекта фалангами захватного устройства без смещения объекта. Их применение особо важно в случае манипулирования хрупкими объектами или объектами сложной конфигурации низкой устойчивости. На этой стадии они выполняют функцию датчиков касания.

Силовой моментные датчики необходимы для распределения усилий, обеспечивающих надежный захват объектов с предотвращением выскальзывания или проворачивания. Тактильные датчики при этом используются для контроля надежности захвата (выполняют роль датчиков потери механического контакта), а оптические датчики — для контроля траектории перемещения.

Помимо указанных сенсорных средств целесообразно использование датчиков внутреннего состояния исполнительных элементов манипулятора (температура приводов, сила тока в обмотках). Указанные датчики применяются для контроля работоспособности функциональных органов комплекса и позволяют существенно повысить срок службы техники за счет перераспределения нагрузки.

Выстраивая иерархию сенсорной аппаратуры манипулятора, необходимо создать алгоритм оценки надежности показаний тех или иных датчиков. При нормальной освещенности рабочей зоны основным источником информации для системы управления служит техническое зрение. Контроль его надежности осуществляется при помощи системы дистанционного осязания. По прерываниям высшей приоритет имеют тактильные датчики и пороговые датчики внутреннего состояния системы (в случае выхода параметров за пределы допустимого диапазона). Силовой моментные датчики также функционируют преимущественно в ключевом режиме контроля предельных усилий, если речь не идет о заданном распределении моментов.

Преимущества идеологии аппаратного разделения технического зрения и дистанционного осязания

К основным достоинствам лазерно-телевизионного метода формометрии относятся высокая скорость и точность определения координат подсвеченных точек, отсутствие необходимости во внешнем освещении и возможность варьирования мощности излучения. Помимо указанных преимуществ подобного подхода к получению информации об окружающей среде необходимо

отметить качественно новые свойства разрабатываемой сенсорной системы. Высокоэффективная фильтрация информации на аппаратном уровне позволяет осуществлять ее предварительную обработку с помощью относительно простых электронных средств.

Более того, она позволяет выделить сенсорную подсистему ориентации и навигации, отделив ее от системы восприятия и распознавания. В этом случае задачи навигации, ориентации, локомоции и манипуляции могут решаться независимым процессором, что увеличивает оперативность принятия решения и динамические возможности мобильного комплекса или манипулятора.

Кроме того, наличие надежных данных о дальности до элементов сцены позволяет перейти к объектно-ориентированному восприятию обстановки и векторному представлению информации при обмене сенсорной системы с основными процессорами. Визуально это реализуется в виде разрывов линий подсветки на границах предметов, что позволяет выделять объекты и определять их местоположение в системе координат комплекса. Существенное снижение требований к информационно-коммуникационным каналам весьма актуально для автономных мобильных комплексов и манипуляторов, действующих в экстремальных условиях.

Задача распознавания и идентификации объектов при таком подходе может решаться с помощью второй пары телекамер и независимого процессора, поскольку инфракрасная подсветка лазерных излучателей незаметна в видимом диапазоне. Для этих целей имеет смысл использовать цветные приемники, совмещенные оптически с камерами системы формометрии для удобства выявления объектов и упрощения процедуры распознавания.

Иерархическое аппаратное разделение задач для систем технического зрения и осязания определяет возможности реализации векторного представления объектов для мобильных платформ и манипуляторов. Объектно-ориентированное восприятие окружающей обстановки в свою очередь создает благоприятные условия для разработки когнитивных и самообучаемых робототехнических систем [5].

Статья подготовлена в ходе выполнения работ по государственному контракту на выполнение научно-исследовательских работ от 15 июня 2009 г. № 02.740.11.0121 с Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Грязнов, Н.А.** Тенденция развития и идеология построения систем сбора координатной информации [Текст] / Н.А. Грязнов, Д.А. Кочкарев // Труды межд. научн.-техн. семинара «Робототехника. Взгляд в будущее». — Санкт-Петербург, 2010. — С. 226–229.
2. **Межерис, Р.** Лазерное дистанционное зондирование [Текст] / Р. Межерис. — М.: Мир, 1987. — 550 с.
3. **Bergmann, D.** New approach for automatic surface reconstruction with coded light [Текст] / D. Bergmann // Proceedings SPIE. — 1995. Vol. 2572. — P. 2–9.
4. **Грязнов, Н.А.** Структурированная лазерная подсветка для технологий трехмерного зрения робототехнических средств [Текст] / Н.А. Грязнов, В.В. Кириченко, Е.В. Егоров // Оптический журнал. — 2007. Т. 74. № 8. — С. 37–43.
5. **Магазов, С.С.** Когнитивные процессы и модели [Текст] / С.С. Магазов. — М.: Изд-во ЛКИ, 2007.

УДК 004.056.4

Л.К. Птицына, А.В. Птицын

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Применение принципа мультиплексирования при организации распределенных систем защиты информации предоставляет широкие возможности совершенствования архитектуры с целью повышения эффективности их функционирования. Преимущества мультиплексирования могут раскрыться в наибольшей степени, если параллельная работа программных и аппаратных средств обеспечения информационной безопасности используется не только при обнаружении возможных угроз, но и при проведении необходимых мероприятий по защите информации. Планирование эффекта от подобных действий становится возможным в случае преодоления неопределенности относительно динамических профилей распределенных систем защиты информации в условиях параллельной работы средств. В связи с этим появляется объективная необходимость определения динамических характеристик систем защиты информации при комплексировании программно-аппаратных средств. Распространенные приемы мониторинга сводятся к оцениванию динамических характеристик в процессе функционирования распределенных систем защиты информации, когда изменения в их конфигурации ограничены возможностями выбранной архитектуры. В то же время неопределенность игнорируется при выборе их архитектуры. Для устранения по-

добной проблемной ситуации предлагается формальный подход к определению динамических характеристик выделенного типа систем защиты информации, который опирается на математический аппарат анализа распределенных процессов в части моделирования механизмов их синхронизации [1].

Ориентируясь на практическую значимость, в качестве динамических характеристик выбираются средние значения времени защиты информации.

Возможные способы комплексирования отдельных средств обеспечения защищенности данных основываются на различных сочетаниях типовых вариантов их согласованного функционирования, к которым относятся:

- параллельное функционирование аппаратных средств;
- параллельное функционирование программных средств;
- параллельное функционирование программных и аппаратных средств.

Применительно к перечисленным типовым вариантам определяются выбранные показатели качества защиты информации.

Среди известных принципов объединения результатов параллельного функционирования отдельных средств широко распространены принципы И-параллельности, ИЛИ-параллель-



ности и «М из N»-параллельности; выбор каждого обуславливается спецификой функционального назначения комплексируемых средств. По этой причине при определении среднего времени защиты информации учитывается характер процедур объединения частных результатов, описываемый с помощью логических функций «И» (\wedge), «ИЛИ» (\vee) и «М из N».

Выполним определение искомых показателей на случай параллельного функционирования аппаратных средств. Пусть каждое n -е аппаратное средство обеспечивает такое выполнение возлагаемых задач, при котором среднее время защиты информации характеризуется величиной $T_{n,P}$. Принимая гипотезу об экспоненциальном распределении времени защиты, находим вероятность того, что все необходимые мероприятия будут реализованы в промежутке времени $(0, t_k)$

$$W_n(t_k) = 1 - e^{-t_k/T_{n,P}}. \quad (1)$$

После нахождения функции распределения времени окончания N параллельно выполняемых функциональных процессов в условиях применения принципа И-параллельности получим следующее соотношение для среднего времени защиты информации T_P :

$$T_P \approx \Delta t \sum_{k=1}^K k \left[\prod_{n=1}^N W_n(t_k) - \prod_{n=1}^N W_n(t_{k-1}) \right], \quad (2)$$

где $\Delta t = t_k - t_{k-1}$, $k = 1, 2, \dots, K$; Δt — интервал обновления результатов работы аппаратных средств защиты информации.

Переменная K — это наименьшее значение, удовлетворяющее неравенству

$$1 - \sum_{k=1}^K \left[\prod_{n=1}^N W_n(t_k) - \prod_{n=1}^N W_n(t_{k-1}) \right] \leq \varepsilon, \quad (3)$$

N — число параллельно работающих аппаратных средств.

В соотношении (3) величина ε представляет собой вероятность события, при котором время защиты информации превышает граничное значение, равное $K\Delta t$.

Через функцию распределения времени окончания N параллельно выполняемых функциональных процессов в условиях применения принципа ИЛИ-параллельности находим среднее время защиты информации для второго типового случая:

$$T_P \approx \Delta t \sum_{k=1}^K k \left[\prod_{n=1}^N (1 - W_n(t_{k-1})) - \prod_{n=1}^N (1 - W_n(t_k)) \right], \quad (4)$$

где K — наименьшее целое значение, удовлетворяющее неравенству

$$1 - \sum_{k=1}^K \left[\prod_{n=1}^N (1 - W_n(t_{k-1})) - \prod_{n=1}^N (1 - W_n(t_k)) \right] \leq \varepsilon. \quad (5)$$

Проанализируем случай параллельного действия программных средств защиты информации. В соответствии с характерными особенностями функционирования программных средств, раскрытыми в [2], n -й подпроцесс защиты информации, включающий M этапов, описывается полумарковской моделью, представленной матрицей P_n вероятностей переходов во множестве состояний

$$P_n = \begin{bmatrix} 0 & 1-P_{n1} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & P_{n1} \\ 0 & 0 & 1-P_{n2} & \dots & 0 & \dots & 0 & P_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1-P_{nj} & \dots & 0 & P_{nj} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1-P_{nm} & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & P_{nM} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

и вектором математических ожиданий времен отражения угроз $[t_{n,1}, t_{n,2}, \dots, t_{n,m}, \dots, t_{n,M}]$.

В результате преобразования графа модели получается выражение (6) для определения среднего времени реализации n -го подпроцесса защиты информации:

$$T_{n,P} = \frac{\left[\prod_{m=1}^{M-1} (1 - P_{n,m}) \right] \sum_{m=1}^M t_{n,m}}{1 - \prod_{m=1}^M (1 - P_{n,m})} +$$

$$+ \frac{t_{n,1} \left[1 - \prod_{m=1}^{M-1} (1 - P_{n,m}) \right]}{1 - \prod_{m=1}^M (1 - P_{n,m})} +$$

$$+ \frac{\sum_{m=2}^{M-1} \left\{ t_{n,m} \left[\prod_{j=1}^{m-1} (1 - P_{n,j}) \left(1 - \prod_{k=m}^{M-1} (1 - P_{n,k}) \right) \right] \right\}}{1 - \prod_{m=1}^M (1 - P_{n,m})} +$$

$$+ \frac{\sum_{m=1}^M P_{n,m} t_{K,n,m} \prod_{k=1}^{m-1} (1 - P_{n,k})}{1 - \prod_{m=1}^M (1 - P_{n,m})}. \quad (6)$$

После подстановки соотношения (6) в (1) математическое ожидание времени защиты определяется по формулам (2), (3) в условиях И-параллельности либо (4), (5) в случае ИЛИ-параллельности.

Рассмотрим порядок определения динамических характеристик распределенных систем защиты информации при параллельной работе программно-аппаратных средств.

По найденным функциям распределения $W_n(t_k)$, $n = 1, 2, \dots, N$, на основании соотношений (2), (3) образуется следующее представление искомой оценки при реализации принципа И-параллельности:

$$T_P \approx \Delta t \sum_{k=1}^K k \left[\left(\prod_{n=1}^{N_S} W_n(t_k) \right) \left(\prod_{n=1}^{N_H} W_n(t_k) \right) - \left(\prod_{n=1}^{N_S} W_n(t_{k-1}) \right) \left(\prod_{n=1}^{N_H} W_n(t_{k-1}) \right) \right]; \quad (7)$$

$$1 - \sum_{k=1}^K \left[\left(\prod_{n=1}^{N_S} W_n(t_k) \right) \left(\prod_{n=1}^{N_H} W_n(t_k) \right) - \left(\prod_{n=1}^{N_S} W_n(t_{k-1}) \right) \left(\prod_{n=1}^{N_H} W_n(t_{k-1}) \right) \right] \leq \varepsilon, \quad (8)$$

где N_S — число программных средств; N_H — число аппаратных средств; $N = N_S + N_H$ — общее число комплекслируемых средств; $W_n(t_k)$, $n = 1, 2, \dots, N_S$ — функции распределения, характеризующие качество защиты информации с применением программных средств; $W_n(t_k)$, $n = 1, 2, \dots, N_H$ — функции распределения, представляющие качество защиты информации при использовании аппаратных средств.

Неравенство (8) предназначается для выбора значения K по заданному уровню ε .

В соответствии с формулами (4), (5) среднее время защиты информации в случае параллельного функционирования программных и аппаратных средств, результаты работы которых объе-

диняются с применением логической функции «ИЛИ», может быть выражено следующим образом:

$$T_0 \approx \Delta t \sum_{k=1}^K k \left[\left(\prod_{n=1}^{N_S} (1 - W_n(t_{k-1})) \right) \left(\prod_{n=1}^{N_H} (1 - W_n(t_{k-1})) \right) - \left(\prod_{n=1}^{N_S} (1 - W_n(t_k)) \right) \left(\prod_{n=1}^{N_H} (1 - W_n(t_k)) \right) \right]; \quad (9)$$

$$1 - \sum_{k=1}^K \left[\left(\prod_{n=1}^{N_S} (1 - W_n(t_{k-1})) \right) \left(\prod_{n=1}^{N_H} (1 - W_n(t_{k-1})) \right) - \left(\prod_{n=1}^{N_S} (1 - W_n(t_k)) \right) \left(\prod_{n=1}^{N_H} (1 - W_n(t_k)) \right) \right] \leq \varepsilon. \quad (10)$$

Верхняя граница для переменной k — это наименьшее значение K , которое удовлетворяет неравенству (10). В данном случае задаваемая величина ε есть вероятность того, что время защиты информации при комплексировании программно-аппаратных средств по принципу ИЛИ-параллельности превышает верхнюю границу $K \Delta t$.

Благодаря использованию неравенств (3), (5), (8), (10) обеспечивается возможность регулирования степени приближения оценок (2), (4), (7), (9) к реальным значениям математических ожиданий значений времени защиты информации.

Формализуем процесс определения динамических характеристик систем защиты информации при комплексировании средств по принципу «М из N»-параллельности. Перейдем к дискретному времени защиты $k = t_k / \Delta t$. Если $f[k]$ — вероятность окончания процесса защиты в момент

времени k , то $F[k] = \sum_{j=1}^k f[j]$ — функция распределения дискретного времени защиты информации $k = 1, 2, \dots, K$. Соответственно применительно к каждому i -му средству указанное обстоятельство представляется следующим образом:

$F_i[k] = \sum_{j=1}^k f_i[j]$, $i = 1, 2, \dots, N$; N — количество комплекслируемых средств.

Частными случаями функции «М из N» являются функции логического «И» («N из N») и «ИЛИ» («1 из N»). Функция распределения ве-



роятностей времени окончания параллельного процесса защиты информации в момент времени k для случая И-параллельности будет иметь вид

$$F_{AND}[k] = \prod_{m=1}^N F_m[k] = \prod_{m=1}^N \left(\sum_{j=1}^k f_m[j] \right). \quad (11)$$

Следовательно, вероятность окончания процесса защиты информации в момент времени k равна

$$\begin{aligned} f_{AND}[k] &= F_{AND}[k] - F_{AND}[k-1] = \\ &= \prod_{m=1}^N \left(\sum_{j=1}^k f_m[j] \right) - \prod_{m=1}^N \left(\sum_{j=1}^{k-1} f_m[j] \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Для модели процесса защиты информации с комплексированием средств согласно функции «ИЛИ» вероятность его окончания в дискретный момент времени k равна вероятности того, что ни одно из комплекслируемых средств не завершило своей работы раньше момента времени k , минус вероятность того, что все они закончили свои действия позже момента времени k :

$$\begin{aligned} f_{OR}[k] &= \prod_{i=1}^N \left(1 - \sum_{j=1}^{k-1} f_i[j] \right) - \prod_{i=1}^N \left(\sum_{j=k+1}^{\infty} f_i[j] \right) = \\ &= \prod_{i=1}^N \left(\sum_{j=k}^{\infty} f_i[j] \right) - \prod_{i=1}^N \left(\sum_{j=k+1}^{\infty} f_i[j] \right) = \\ &= \prod_{i=1}^N \left(1 - \sum_{j=1}^{k-1} f_i[j] \right) - \prod_{i=1}^N \left(1 - \sum_{j=1}^k f_i[j] \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Функция распределения вероятностей времени окончания параллельного процесса защиты информации имеет следующий вид:

$$F_{OR}[k] = \sum_{j=1}^k f_{OR}[j]. \quad (14)$$

Для случая «М из N»-параллельности функция распределения вероятностей времени окончания параллельного процесса защиты информации $F_{MAJ}^{M,N}[k]$ может быть выражена так:

$$F_{MAJ}^{M,N}[k] = \begin{cases} F_{AND}[k] & \text{при } M = N; \\ F_{OR}[k] & \text{при } M = 1; \\ G(N, M, N, k) & \text{при } M < N, M \neq 1, \end{cases} \quad (15)$$

где $G(N, M, IND, k) =$

$$= \begin{cases} 0, & \text{если } M > N; \\ F_{OR}[k], & \text{если } M = 1; \\ F_{AND}[k], & \text{если } M = N; \\ F_{IND}[k]G(N-1, M-1, IND-1, k) + \\ & + (1 - F_{IND}[k])G(N-1, M, IND-1, k), \\ & \text{если } M < N. \end{cases}$$

Здесь $IND \in 1, \dots, N$ — порядковый номер средства защиты информации из группы комплекслируемых; $F_{IND}[k]$ — функция распределения вероятностей времен окончания процесса защиты информации при помощи средства с номером IND .

Соответственно вероятность окончания параллельного процесса рассматриваемого типа в момент времени k равна

$$f[k] = F_{MAJ}^{M,N}[k] - F_{MAJ}^{M,N}[k-1]. \quad (16)$$

Соотношения (11)–(16) применимы при анализе моделей процессов функционирования комплекслируемых средств защиты информации, которые описываются полной группой событий, то есть

$$\sum_{k=1}^{K_i} f_i[k] = 1, \text{ где } \forall i \in 1, 2, \dots, N,$$

N — количество комплекслируемых средств защиты информации; K_i — верхняя граница времени защиты информации с помощью i -го средства; $f_i[k]$ — вероятность окончания i -го подпроцесса защиты информации в момент времени k .

В рассматриваемом варианте среднее время защиты информации находится по формуле

$$T_p \approx \Delta t \sum_{k=1}^K k f[k], \quad 1 - \sum_{k=1}^K f[k] \leq \varepsilon. \quad (17)$$

Выражения (1)–(17) образуют базис для получения приближенной количественной оценки показателей качества распределенных систем защиты информации при комплексировании программно-аппаратных средств по принципу И-параллельности, ИЛИ-параллельности и «М из N»-параллельности с регулируемой степенью приближения.

Разработанное математическое обеспечение позволяет:

оценивать и контролировать уровень динамических характеристик и управлять качеством защиты информации в действующих распределенных инфраструктурах;

выбирать состав средств для комплексирования в действующих и проектируемых распределенных системах защиты информации и регулировать масштабируемость при установленных требованиях к их качеству;

обеспечивать интеллектуальность распределенных систем защиты информации за счет программного сопровождения в реальном масштабе времени процедур оценки и контроля уровня динамических характеристик и управления их качеством.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Птицына, Л.К. Программное обеспечение компьютерных сетей. Моделирование механизмов синхронизации параллельных вычислительных процессов в системах мониторинга и управления [Текст]: учеб. пособие. / Л.К. Птицына, Н.В. Соколова.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.— 213 с.

2. Птицына, Л.К. Архитектура ЭВМ и систем. Модели и методы анализа динамических характеристик программных систем защиты информации [Текст]: учеб. пособие / Л.К. Птицына, А.В. Птицын.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007.— 131 с.

УДК 539.3

Л.А. Розин, А.А. Лукашевич

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧ С ТРЕНИЕМ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Конструктивно нелинейные задачи с трением Кулона между контактирующими телами довольно часто встречаются при расчете различного рода сооружений. Рассмотрению таких задач при статических нагрузках посвящены, например, работы [1, 2]. Вместе с тем встречаются задачи, где требуется учитывать и различного вида динамические воздействия. Контактное взаимодействие между сооружением и основанием в этом случае моделируется сменой во времени рабочих схем сооружения (обусловлено включением и выключением односторонних связей в касательном направлении, т. е. сцеплением, либо проскальзыванием). В пределах каждой такой рабочей схемы между двумя последовательными событиями на контакте характер деформирования рассматриваемой системы предполагается линейным.

Численное решение динамической задачи производится путем дискретизации по времени с использованием прямых схем интегрирования уравнений движения [3]. После каждого шага по времени Δt проверяются граничные условия (кулоновское трение) на контакте. Если в пределах какого-либо шага происходит смена рабочей схемы, то момент времени изменения состояния

контакта, т. е. наступления очередного события, определяется пошаговым моделированием с применением соответствующих (согласно используемой схеме интегрирования) аппроксимирующих выражений для перемещений, скоростей и ускорений на интервале Δt . При этом корректируется продолжительность шага интегрирования и производится его перерасчет. В результате устанавливается новое состояние контакта на данный момент времени и происходит смена текущей рабочей схемы сооружения.

Ниже рассматривается плоская динамическая задача взаимодействия линейно упругих тел V^+ и V^- (например, сооружение и основание) с контактирующими поверхностями — соответственно S_c^+ и S_c^- . Для расчета указанной системы будем использовать дискретную расчетную модель МКЭ, для которой справедливо следующее матричное уравнение движения с начальными условиями [3]:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}}^{t+\Delta t} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{U}}^{t+\Delta t} + \mathbf{K} \mathbf{U}^{t+\Delta t} = \mathbf{P}^{t+\Delta t};$$
$$\mathbf{U} \big|_{t=0} = \mathbf{U}_0, \quad \dot{\mathbf{U}} \big|_{t=0} = \dot{\mathbf{U}}_0, \quad (1)$$

где \mathbf{M} , \mathbf{C} и \mathbf{K} — соответственно матрицы масс, демпфирования и жесткости системы конечных



элементов; $\mathbf{U}^{t+\Delta t}$, $\dot{\mathbf{U}}^{t+\Delta t}$, $\ddot{\mathbf{U}}^{t+\Delta t}$ и $\mathbf{P}^{t+\Delta t}$ — векторы узловых перемещений, скоростей, ускорений и внешней узловой нагрузки в момент времени $t + \Delta t$. Кроме того, на части внешних границ S_g^+ , S_g^- (соответственно для V^+ , V^-) должны быть заданы граничные условия в усилиях, а на S_u^+ , S_u^- — в перемещениях.

Принимая во внимание, что перемещение в момент времени $t + \Delta t$ можно представить как $\mathbf{U}^{t+\Delta t} = \mathbf{U}^t + \Delta \mathbf{U}^{t+\Delta t}$, где $\Delta \mathbf{U}^{t+\Delta t}$ — приращение перемещений на шаге Δt , преобразуем уравнение (1) к виду, позволяющему решить конструктивно нелинейной динамической задачи свести к решению последовательности линейных динамических задач на основе метода пошагового моделирования состояния на контакте. При этом на каждом шаге по времени Δt будет решаться система линейных дифференциальных уравнений второго порядка вида

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}}^{t+\Delta t} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{U}}^{t+\Delta t} + \mathbf{K} \Delta \mathbf{U}^{t+\Delta t} = \mathbf{P}^{t+\Delta t} - \mathbf{K} \mathbf{U}^t. \quad (2)$$

Здесь предполагается, что в начальный момент времени ($t = 0$) известны векторы перемещений, скоростей и ускорений и необходимо найти решение (2) на интересующем нас интервале времени от 0 до некоторого T .

Для численного интегрирования уравнений движения (2) используется неявная конечно-разностная схема Ньюмарка, в основе которой предположение о линейном изменении ускорений в интервале Δt [3]. При этом используются следующие зависимости между приращениями перемещений, скоростями и ускорениями для момента времени $t + \Delta t$:

$$\ddot{\mathbf{U}}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\alpha(\Delta t)^2} [\Delta \mathbf{U}^{t+\Delta t} - \Delta t \dot{\mathbf{U}}^t] - \left(1 - \frac{1}{2\alpha}\right) \ddot{\mathbf{U}}^t; \quad \dot{\mathbf{U}}^{t+\Delta t} = \dot{\mathbf{U}}^t + [(1-\beta)\ddot{\mathbf{U}}^t + \beta \ddot{\mathbf{U}}^{t+\Delta t}] \Delta t. \quad (3)$$

Здесь α и β — параметры, определяющие точность и устойчивость процесса интегрирования. Принимаем $\alpha = 1/4$, $\beta = 1/2$, что соответствует случаю постоянного среднего ускорения на каждом из интервалов Δt . В этом случае схема Ньюмарка для линейных задач является безусловно устойчивой, т. е. решение при любых начальных условиях не растет неограниченно при больших значениях шага Δt .

Подставив выражения (3) в уравнение (2), тем самым исключив $\ddot{\mathbf{U}}^{t+\Delta t}$ и $\dot{\mathbf{U}}^{t+\Delta t}$ из числа не-

известных, после несложных преобразований получим следующее матричное уравнение для определения $\Delta \mathbf{U}^{t+\Delta t}$:

$$\hat{\mathbf{K}} \Delta \mathbf{U}^{t+\Delta t} = \hat{\mathbf{P}}^{t+\Delta t}, \quad (4)$$

где $\hat{\mathbf{K}} = \mathbf{K} + \alpha_0 \mathbf{M} + \alpha_1 \mathbf{C}$ — эффективная матрица жесткости; $\hat{\mathbf{P}}^{t+\Delta t} = \mathbf{P}^{t+\Delta t} + \mathbf{M}(\alpha_2 \dot{\mathbf{U}}^t + \alpha_3 \ddot{\mathbf{U}}^t) + \mathbf{C}(\alpha_4 \dot{\mathbf{U}}^t + \alpha_5 \ddot{\mathbf{U}}^t) - \mathbf{K} \mathbf{U}^t$ — эффективный вектор внешних сил; коэффициенты $\alpha_0 - \alpha_5$ зависят от шага интегрирования Δt и параметров α и β , их выражения приведены в [3].

Система алгебраических уравнений (4) решается методом \mathbf{LDL}^T -факторизации, учитывающим разреженность симметричной матрицы $\hat{\mathbf{K}}$ и ее переменный профиль. После нахождения $\Delta \mathbf{U}^{t+\Delta t}$ и $\mathbf{U}^{t+\Delta t}$ для вычисления ускорений $\ddot{\mathbf{U}}^{t+\Delta t}$ и скоростей $\dot{\mathbf{U}}^{t+\Delta t}$ используются уравнения (3). В свою очередь в любой момент времени t' в пределах интервала Δt ($t \leq t' \leq t + \Delta t$) значения ускорений $\ddot{\mathbf{U}}(t')$, скоростей $\dot{\mathbf{U}}(t')$ и перемещений $\mathbf{U}(t')$ могут быть рассчитаны по следующим формулам:

$$\ddot{\mathbf{U}}(t') = \ddot{\mathbf{U}}^t + \frac{(t' - t)}{\Delta t} [\ddot{\mathbf{U}}^{t+\Delta t} - \ddot{\mathbf{U}}^t]; \quad \dot{\mathbf{U}}(t') = \dot{\mathbf{U}}^t + \frac{(t' - t)}{2} [\ddot{\mathbf{U}}^t + \ddot{\mathbf{U}}^{t+\Delta t}]; \quad (5)$$

$$\mathbf{U}(t') = \mathbf{U}^t + (t' - t) \dot{\mathbf{U}}^t + \frac{(t' - t)^2}{4} [\ddot{\mathbf{U}}^t + \ddot{\mathbf{U}}^{t+\Delta t}].$$

Первое из уравнений (5) согласно схеме Ньюмарка выражает линейный закон изменения ускорения на интервале Δt , второе и третье получаются из выражений (3) при подстановке в них значений $\alpha = 1/4$, $\beta = 1/2$ и замене величины $(t + \Delta t)$ на величину t' .

Кроме того, при учете трения Кулона дополнительно к начальным условиям при $t = 0$ и граничным условиям на S_g^+ , S_g^- должны выполняться также следующие условия на контактных поверхностях S_c^+ , S_c^- , записанные для момента времени t [2]:

$$|\sigma_t^t| \leq -f \sigma_n^t; \quad \sigma_t^t \dot{u}_t^t \leq 0; \quad (|\sigma_t^t| + f \sigma_n^t) \dot{u}_t^t = 0. \quad (6)$$

Здесь u_t^t — взаимное перемещение контактных поверхностей по касательной в момент времени t ;

$\dot{u}_\tau^t = \partial u_\tau^t / \partial t$ — скорость взаимных касательных перемещений; $\sigma_n^t, \sigma_\tau^t$ — нормальное и касательное напряжения на площадке контакте; f — коэффициент трения Кулона. Действие односторонних связей в направлении нормали в данной работе не рассматривается (алгоритм их учета при отсутствии трения в задачах на динамические воздействия изложен в работе [4]). При этом принимается, что нормальные напряжения на контакте удовлетворяют условию $\sigma_n^t < 0$, т. е. являются сжимающими.

Для моделирования контактного взаимодействия будем использовать контактные конечные элементы (ККЭ) рамного типа [1, 5]. ККЭ вводятся на участках контакта между граничными поверхностями взаимодействующих тел, тем самым дискретизируя контактный слой между ними (при этом свойства конструктивной нелинейности будут реализованы в дискретной модели посредством данного слоя).

Рассматривая i -й ККЭ как i -ю дискретную связь между противоположащими узлами граничных поверхностей S_c^+ и S_c^- , перепишем условия (6) в терминах усилий и перемещений для каждого i -го контактного элемента ($i \in S_c, S_c = S_c^+ \cup S_c^-$):

$$|Q_i^t| \leq |Q_{pi}^t| = -f N_i^t; \quad (7)$$

$$Q_i^t \dot{u}_{\tau i}^t \geq 0; \quad (Q_i^t - Q_{pi}^t) \dot{u}_{\tau i}^t = 0. \quad (8)$$

Здесь (рис. 1) $u_{\tau i}^t$ — взаимное смещение по касательной противоположащих узлов i -го ККЭ на S_c^+ и S_c^- ; $\dot{u}_{\tau i}^t$ — скорость взаимного перемещения (проскальзывания) этих узлов. N_i^t, Q_i^t — продольная и поперечная силы в i -м ККЭ в момент времени t , причем поперечная сила по направлению противоположна контактному напряже-

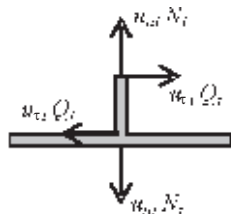


Рис. 1. Контактные перемещения и усилия в ККЭ

нию σ_τ^t ; Q_{pi}^t — предельная поперечная сила, соответствующая предельному касательному напряжению, но также противоположная ему по направлению: $Q_{pi}^t = \text{sign}(Q_i^t) f_i |N_i^t|$.

Условия (8) имеют следующий физический смысл: они устанавливают соответствие между скоростью взаимного проскальзывания противоположащих узлов на S_c^+ и S_c^- и величиной усилия Q_i^t для i -го ККЭ в момент времени t . При условиях $|Q_i^t| < |Q_{pi}^t|, \dot{u}_{\tau i}^t = 0$ имеет место состояние сцепления (допредельное трение). При $Q_i^t = Q_{pi}^t, \dot{u}_{\tau i}^t \neq 0$ — состояние проскальзывания (предельное трение), причем направление скорости проскальзывания согласуется с направлением поперечной силы. В нашем случае направления $\dot{u}_{\tau i}^t$ и Q_i^t должны совпадать.

Численное решение динамической контактной задачи будет заключаться в проведении процесса пошагового интегрирования по времени уравнений движения (2) при соответствующих начальных и граничных условиях, а также выполнении условий на контакте в виде (7), (8).

Будем считать дискретный контактный слой абсолютно жестким в нормальном и касательном направлениях. Тогда при численном расчете состояние сцепления $\dot{u}_{\tau i}^t = 0$ будем моделировать заданием очень большой жесткости ККЭ по касательной к граничным поверхностям, а состояние проскальзывания $Q_i^t = Q_{pi}^t$ — заданием нулевой касательной жесткости ККЭ. Изменение текущего состояния, а именно момент перехода от одного состояния к другому, представляет собой событие — событие проскальзывания или событие зацепления.

Предполагается, что между двумя последовательными событиями система деформируется по линейному закону. Таким образом, решение конструктивно нелинейной контактной динамической задачи будет представляться в виде решения последовательности линейных динамических задач при последовательном изменении расчетных схем сооружения.

Приведем кратко порядок действий, реализующих пошаговый алгоритм решения динамической контактной задачи при наличии трения Кулона. Будем рассматривать случай, когда нор-



мальные силы взаимодействия и соответственно предельные силы трения на контакте заданы, т. е. не меняются в процессе динамического нагружения.

Считается, что в текущий момент времени t состояние на контакте известно. Для каждой i -й связи (то есть ККЭ) определены значения взаимных смещений $u_{\tau i}^t$, скоростей $\dot{u}_{\tau i}^t$ и усилий Q_i^t , Q_{pi}^t . Пусть часть связей ($i \in S_{1c}$, $S_{1c} = S_{1c}^+ \cup S_{1c}^-$) находится в состоянии сцепления, другая часть ($i \in S_{2c}$, $S_{2c} = S_{2c}^+ \cup S_{2c}^-$) — в состоянии скольжения. При этом $S_c = S_{1c} \cup S_{2c}$. В начале расчета, при $t = 0$, взаимные перемещения $u_{\tau i}^t$ (а также скорости и ускорения) принимаются нулевыми. Заданы нормальные силы взаимодействия на контакте N_i . Далее алгоритм действий следующий.

1. Выполняется основной шаг по времени Δt (в процессе расчета величина текущего шага может изменяться в соответствии с установленными моментами наступления событий на контакте). Из решения матричного уравнения (4) определяются приращения перемещений $\Delta u_{\tau i}^{t+\Delta t}$, затем перемещения $u_{\tau i}^{t+\Delta t}$, скорости $\dot{u}_{\tau i}^{t+\Delta t}$, усилия на контакте $Q_i^{t+\Delta t}$, а также предельные усилия $Q_{pi}^{t+\Delta t} = \text{sign}(Q_i^{t+\Delta t}) f_i |N_i|$ для момента времени $t + \Delta t$.

2. Выполняется обход по всем ККЭ, при этом для каждой i -й связи находится момент наступления (в пределах основного шага Δt) очередного события на контакте — проскальзывания либо зацепления. Поскольку изменение перемещений, скоростей и усилий в пределах шага Δt согласно уравнениям (5) происходит не по линейному закону, то для определения момента наступления ближайшего по времени события \hat{t}_i (для каждой i -й связи) используется процедура последовательных приближений.

Таким образом, момент проскальзывания (т. е. срабатывания условия предельного трения $Q_i^t = Q_{pi}^t$) для каждой i -й связи, находящейся до

этого в состоянии сцепления (при $|Q_i^t| < |Q_{pi}^t|$), вычисляем с помощью следующей итерационной формулы:

$$\hat{t}_i^k = t_{1i}^{k-1} + (t_{2i}^{k-1} - t_{1i}^{k-1}) \times \left(\frac{Q_{pi}^{t+\Delta t} - Q_i(t_{1i}^{k-1})}{[Q_i(t_{2i}^{k-1}) - Q_i(t_{1i}^{k-1})]} \right), \quad i \in S_{1c}. \quad (9)$$

Здесь t_{1i}^{k-1} , t_{2i}^{k-1} — начало и конец интервала, в котором с помощью линейной интерполяции находится k -е приближение \hat{t}_i^k . Для первого приближения этот интервал (t_{1i}^0, t_{2i}^0) равен шагу Δt ,

т. е. $t_{1i}^0 = t$, $t_{2i}^0 = t + \Delta t$, $Q_i(t_{1i}^0) = Q_i^t$, $Q_i(t_{2i}^0) = Q_i^{t+\Delta t}$; в дальнейшем при последующих приближениях интервал монотонно сужается. Так, например, после нахождения очередного приближения \hat{t}_i^k с помощью уравнений (5) выполняется уточнение взаимных смещений, по ним определяют

усилия $Q_i(\hat{t}_i^k)$ для момента времени \hat{t}_i^k и сопоставляют полученные величины с граничными значениями $Q_i(\hat{t}_{1i}^{k-1})$, $Q_i(\hat{t}_{2i}^{k-1})$ и $Q_{pi}^{t+\Delta t}$ для текущего интервала. В результате чего устанавливаются границы интервала (t_{1i}^k, t_{2i}^k) для следующего, $(k+1)$ -го приближения. Итерационный процесс заканчивается при достижении относительной разностью величин $Q_i(\hat{t}_i^k)$ и $Q_{pi}^{t+\Delta t}$ некоторой заданной точности вычислений:

$$\frac{|Q_i(\hat{t}_i^k) - Q_{pi}^{t+\Delta t}|}{|Q_{pi}^{t+\Delta t}|} \leq \varepsilon. \quad \text{При этом окончательно при-}$$

нимаем $\hat{t}_i = \hat{t}_i^k$.

Момент зацепления (т. е. срабатывание условия $\dot{u}_{\tau i}^t = 0$) для каждой i -й связи, находящейся до этого в состоянии скольжения (при $\dot{u}_{\tau i}^t \neq 0$), вычисляем по следующей итерационной формуле:

$$\hat{t}_i^k = t_{1i}^{k-1} + (t_{2i}^{k-1} - t_{1i}^{k-1}) \times \left(\frac{-\dot{u}_{\tau i}(t_{1i}^{k-1})}{\dot{u}_{\tau i}(t_{2i}^{k-1}) - \dot{u}_{\tau i}(t_{1i}^{k-1})} \right), \quad i \in S_{2c}. \quad (10)$$

Для первого приближения принимается: $t_{1i}^0 = t$, $t_{2i}^0 = t + \Delta t$, $\dot{u}_{\tau i}(t_{1i}^0) = \dot{u}_{\tau i}^t$, $\dot{u}_{\tau i}(t_{2i}^0) = \dot{u}_{\tau i}^{t+\Delta t}$. Процесс приближений здесь аналогичен предыдущему.

3. Из всех значений \hat{t}_i , найденных с помощью формул (9), (10) и находящихся в интервале $(t, t + \Delta t)$, выбирается наименьшее, соответствующее моменту наступления ближайшего по времени события на контакте:

$$\hat{t}_{\min} = \min(\hat{t}_i), \quad i \in S_c. \quad (11)$$

В случае, если $\hat{t}_{\min} > t + \Delta t$, выполняется следующий основной шаг интегрирования по времени продолжительностью Δt и в его пределах ведется поиск \hat{t}_{\min} (т. е. следует повтор цикла с п.1). Если же $t < \hat{t}_{\min} < t + \Delta t$, то выполняется перерасчет уточненного таким образом шага по времени с величиной $\Delta \hat{t} = \hat{t}_{\min} - t$.

4. При перерасчете шага определяются окончательные значения $u_{ci}^{t+\Delta \hat{t}}$, $\dot{u}_{ci}^{t+\Delta \hat{t}}$, $Q_i^{t+\Delta \hat{t}}$, $Q_{pi}^{t+\Delta \hat{t}}$ для текущего момента времени $t + \Delta \hat{t}$. Проверяются условия наступления ожидаемого события: в случае проскальзывания — $Q_i^t = Q_{pi}^t$; в случае зацепления — $\dot{u}_{ci}^t = 0$.

Если соответствующее условие (с учетом заданной погрешности вычислений) не срабатывает, производится повторное уточнение момента времени \hat{t}_{\min} , но уже на интервале (t, \hat{t}_{\min}) либо $(\hat{t}_{\min}, t + \Delta t)$.

5. В случае наступления очередного по времени события — на соответствующей опоре меняется состояние контакта — в модели меняется текущая рабочая схема сооружения, при этом результаты пересчитанного шага считаются конечными для момента времени $t + \Delta \hat{t}$.

Далее повторяются все перечисленные действия, но уже для следующего основного шага интегрирования Δt .

Продemonстрируем изложенный подход на примере расчета плоской стержневой системы

в условиях динамического нагружения (рис. 2, а). На средних опорах ($i = 1, 2, 3$) действует трение Кулона (величина коэффициента трения в расчетах варьировалась в диапазоне от 0,1 до 1,0).

В начальный момент времени стержневая система находится в состоянии покоя при заданных в опорных узлах 1–3 вертикальных силах $F_i = 25; 15; 5$ кН. Затем одновременно на левом конце балки и в узле 2 прикладывались горизонтальные импульсные нагрузки $P(t)$. Закон изменения импульса имеет треугольную форму, продолжительность 0,2 с, амплитуда 20 кН (рис. 2, б).

Продольная жесткость стержней принималась равной 50000 кН; масса системы приведена к узлам ($m = 400$ кг); матрица демпфирования здесь вычислялась как $C = \alpha M$ (коэффициент α принимался равным 0,1). Контактное взаимодействие моделировалось с помощью рамных ККЭ, соединяющих опорные узлы стержневой системы с неподвижными опорами. Нормальные силы взаимодействия N_i на контакте узлов с соответствующими опорами принимались равными силам F_i .

В начальный момент времени $t = 0$ на всех опорах задавалось состояние сцепления. В дальнейшем в результате действия динамической нагрузки возможно как проскальзывание, так и последующее зацепление на контакте в течение рассматриваемого промежутка времени.

Для того чтобы изучить зависимость решения от величины шага интегрирования по времени, было просчитано поведение стержневой системы для разных значений Δt в диапазоне от 0,0001 до 0,0128 с (с последовательным удвоением длины шага). Здесь нижняя граница диапазона соответствует 1/1300 от основного периода собственных колебаний рассматриваемой системы в условиях начального сцепления на опорах 1–3; верхняя граница — 1/10 от основного периода колебаний ($T_0 = 0,13$ с).

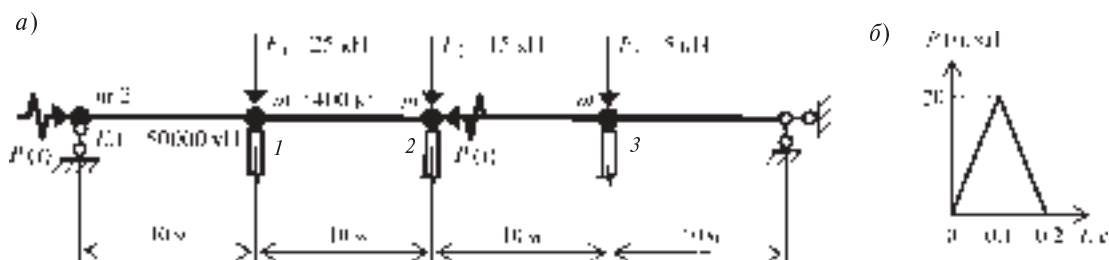


Рис. 2. Стержневая система (а) с заданными на контакте нормальными силами под действием импульсных нагрузок $P(t)$ (б)

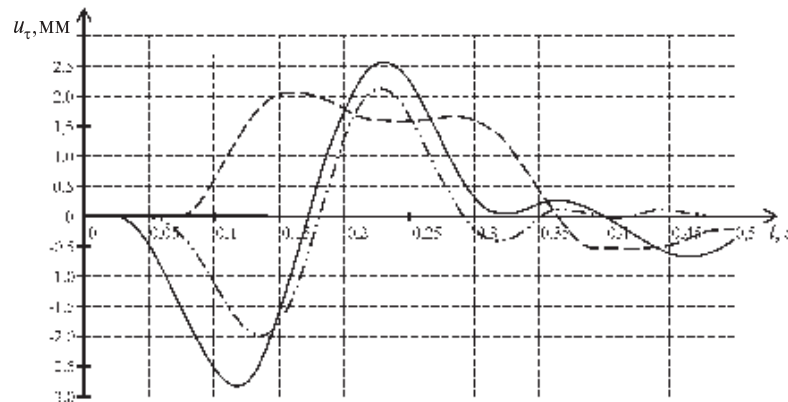


Рис. 3. Горизонтальные смещения (проскальзывание) на опорах 1 (---), 2 (—) и 3 (-·-·-) при шаге по времени $\Delta t = 0,0001$ с

Результаты, полученные при разных значениях основного шага интегрирования из указанной выше последовательности, сравнивались с решением для шага $\Delta t = 0,0001$ с (рис. 3).

На рис. 4 показано горизонтальное смещение (проскальзывание) на опоре 2 при значениях шага $\Delta t = 0,0001$; $0,0002$; $0,0008$; $0,0032$; $0,0128$ с.

Рис. 5 иллюстрирует сходимость и точность получаемого решения (амплитудное значение смещения на опоре 2) в зависимости от выбранного шага Δt при разных значениях коэффициента трения f на контакте.

Относительная невязка δ подсчитывалась

здесь как $\delta = \left| \frac{u_{\Delta t_n} - u_{\Delta t_1}}{u_{\Delta t_1}} \right| \cdot 100\%$, где $u_{\Delta t_n}$ — ам-

плитуда смещения на опоре 2 при шаге интегрирования Δt_n , выбранном из приведенной выше последовательности; $u_{\Delta t_1}$ — амплитуда смещения при использовании шага интегрирования $\Delta t_1 = 0,0001$ с.

Как видно из приведенных графиков, предлагаемый численный подход дает удовлетворительную точность решения в достаточно широком диапазоне временных шагов интегрирования. Так, представленные здесь результаты практически совпадают при значениях основного шага в диапазоне от $0,0001$ до $0,0016$ с. С дальнейшим увеличением величины Δt наблюдается некоторое расхождение в полученных результатах, особенно при больших значениях коэффициента трения. Заметим также, что в общем слу-

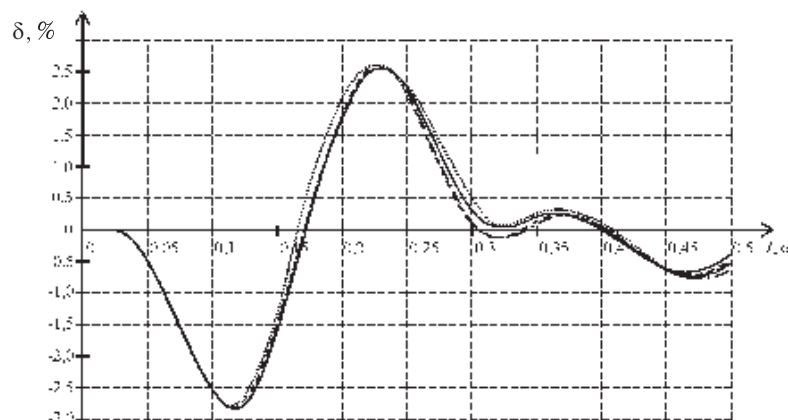


Рис. 4. Горизонтальное смещение на опоре 2 при разных величинах шагов интегрирования по времени Δt : — $0,0001$ с; --- $0,0002$ с; -·-·- $0,0008$ с; ····· $0,0032$ с; -·-·-· $0,0128$ с;

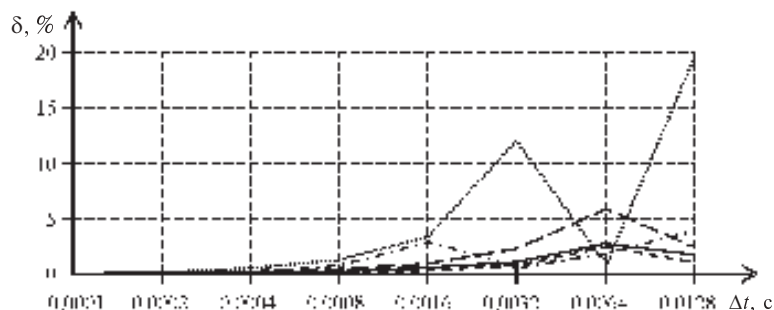


Рис. 5. Зависимость решения от шага Δt интегрирования по времени при значениях коэффициента трения f : 0,1 (—), 0,3 (.....), 0,5 (— · — · —), 0,7 (.....), 1,0 (.....)

чае выбор оптимального шага интегрирования достаточно сложен [3]. В этой связи на основании проведенных численных исследований можно рекомендовать выбирать величину основного

шага интегрирования таким образом, чтобы при его увеличении (например, вдвое) изменение результатов не превышало некоторой задаваемой погрешности расчета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукашевич, А.А. Решение контактных упругих задач с трением Кулона при пошаговом нагружении [Текст] / А.А. Лукашевич // Изв. вузов. Строительство. — 2008. № 10. — С. 14–21.
2. Вовкушевский, А.В. Постановка и решение контактной задачи теории упругости с трением при произвольном процессе нагружения [Текст] / А.В. Вовкушевский // Труды ЛПИ. — 1985. № 405. — С. 9–13.
3. Бате, Л. Численные методы анализа и метод конечных элементов [Текст] / Л. Бате, Е. Вилсон. — М.: Стройиздат, 1982. — 448 с.
4. Розин, Л.А. Решение задач с односторонними связями при динамических воздействиях [Текст] / Л.А. Розин, А.А. Лукашевич // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2009. № 3 (84). — С. 195–199.
5. Лукашевич, А.А. Построение и реализация схем прямого метода конечных элементов для решения контактных задач [Текст] / А.А. Лукашевич // Изв. вузов. Строительство. — 2007. № 12. — С. 18–23.

УДК 681.586;681.335.2

И.Н. Вольнов, В.С. Нагорный

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ МОНОДИСПЕРСНЫХ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ В ЭЛЕКТРОКАПЛЕСТРУЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Электрокаплеструйные оборудование и технологии (с использованием микропроцессоров или микроЭВМ) базируются на создании линейной последовательности потока монодисперсных капель рабочей жидкости одинакового диаметра (десятки, сотни микрометров), находящихся на одинаковом расстоянии друг от друга. Таких капель в секунду может быть сформировано до ста

тысяч на одном сопле. В точке отрыва капле от струи размещается зарядный электрод, и любой выбранной из этой последовательности капле рабочей жидкости сообщается электрический заряд заданной величины того или иного знака. Величина электрического заряда капли прямо пропорциональна напряжению на зарядном электроде. Далее пролетая в постоянном электрическом поле



между пластинами отклоняющих электродов, на которые подается постоянное напряжение, каждая заряженная капля отклоняется пропорционально полученному заряду и попадает в заданную определяемую технологическим процессом точку носителя информации. Капли, не получившие заряда и не участвующие в процессе формирования, летят по прямой траектории и попадают в улавливатель. Из него жидкость поступает через фильтр обратно в систему подачи рабочей жидкости, и таким образом осуществляется замкнутый контур ее циркуляции.

Синхронизация дробления струи рабочей жидкости на монодисперсные капли производится с помощью пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП), который, меняя свои геометрические параметры за счет обратного пьезоэффекта под действием гармонического управляющего электрического сигнала, вносит вынужденные возмущения в вытекающую струю рабочей жидкости. При этом расстояние между каплями в линейной последовательности равно длине волны возмущения от ПЭП $\lambda = v / f$, где v — средняя скорость струи рабочей жидкости, f — частота электрического напряжения на электродах ПЭП [1]. Частота каплеобразования равна частоте f напряжения на электродах ПЭП [1].

В данной статье предлагается способ моделирования процесса распада струи рабочей жидкости на монодисперсные капли с помощью программного комплекса вычислительной гидродинамики *FLOW-3D*[®] (США, www.flow3d.com, www.flow3d.ru) [2]. Отличительная особенность *FLOW-3D*[®] состоит в высокой точности и вычислительной эффективности решения гидродинамических задач с так называемой свободной поверхностью, или поверхностью раздела между жидкостью и газом, что как раз имеет место в вытекающей в газовую среду (воздух) струе рабочей жидкости при реализации электрокаплеструйных технологий.

Постановка задачи моделирования процесса монодисперсного каплеобразования во *FLOW-3D*[®]

Решалась задача разработки способа численного моделирования с помощью программного комплекса вычислительной гидродинамики *FLOW-3D*[®] процесса монодиспергирования струи жидкости с учетом работы ПЭП как источника вынужденных возмущений.

При этом в качестве критерия правильности численной модели использовались результаты сравнения расчетных данных с известными экспериментальными данными для дистиллированной воды по такому важному параметру для электрокаплеструйных технологий, как расстояние L от среза формирующего сопла до точки отрыва капли от струи.

Расчетная схема с моделированием работы ПЭП показана на рис. 1.

Рабочая жидкость 1 под высоким постоянным избыточным давлением P от насоса подается в электрокаплеструйную головку и в виде ламинарной струи выходит из формирующего сопла 2. На расстоянии L от среза сопла, где и размещается зарядный электрод, струя распадается на монодисперсные капли. Распад струи на монодисперсные капли синхронизируется пьезоэлектрическим преобразователем 3 под действием переменного электрического напряжения U_n частотой f , подаваемого на электроды ПЭП.

При пренебрежении сжимаемостью рабочей жидкости и силами гравитации динамику течения струи описывают системой уравнений Навье — Стокса и уравнением неразрывности [3]:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{U};$$

$$\nabla \mathbf{U} = 0, \quad (1)$$

где p — давление в рабочей жидкости, которая истекает из формирующего струю сопла; ρ , μ —

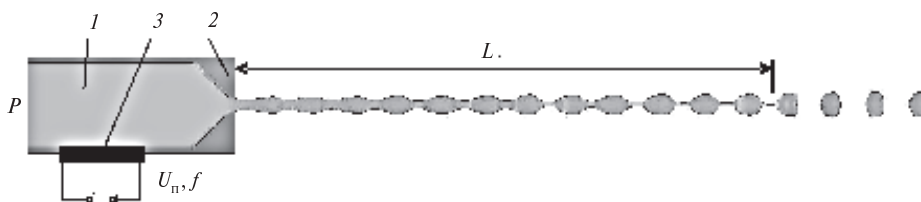


Рис. 1. Расчетная схема получения монодисперсного линейного потока капель при реализации электрокаплеструйной технологии

плотность и динамический коэффициент вязкости рабочей жидкости; $\mathbf{U} = (u, v, \omega)$ — вектор скорости течения рабочей жидкости и его компоненты u, v, ω по соответствующим пространственным координатам x, y, z ; $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$ — оператор Гамильтона; $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ — единичные векторы по осям x, y, z ; t — время.

Дополним систему уравнений (1) граничными условиями.

1. На левой границе электрокаплеструйной головки (см. рис. 1) давление в жидкости задается равным постоянному давлению на входе в головку:

$$p = P.$$

2. На внутренней границе электрокаплеструйной головки — границе контакта жидкости со стенками головки — принимается условие “прилипания”, т. е. скорость частиц жидкости на твердых стенках считается равной скорости движения этих стенок. Если стенки неподвижны, то скорость равна нулю:

$$\mathbf{U} = 0. \quad (2)$$

2.1. Часть внутренней границы электрокаплеструйной головки, оформляющая пьезоэлектрический преобразователь, во *FLOW-3D*® ПЭП моделируется как подвижное твердое тело типа пластины (см. рис. 1), размещенное в боковой стенке электрокаплеструйной головки. Колебательное движение пластины 3 ПЭП осуществляется в направлении, перпендикулярном истечению рабочей жидкости 1 из формирующего сопла 2, и описывается гармоническим законом

$$U|_{\text{ПЭП}} = U_{\text{ПЭП}} = A \sin(2\pi f t + \phi_0), \quad (3)$$

где $U|_{\text{ПЭП}}$ — скорость жидкости на поверхности ПЭП; $U_{\text{ПЭП}}$ — скорость движения стенки ПЭП; A, f, ϕ_0 — соответственно амплитуда скорости, частота и начальная фаза движения стенки ПЭП.

3. На свободной поверхности жидкости — границе струи, вышедшей из электрокаплеструйной головки — давление задается в виде давления, связанного с поверхностным натяжением рабочей жидкости и определяемого в соответствии с формулой Лапласа

$$p = p_{\text{атм}} + \sigma(1/r_1 + 1/r_2), \quad (4)$$

где $p_{\text{атм}}$ — атмосферное давление; σ — коэффициент поверхностного натяжения рабочей жид-

кости; r_1 и r_2 — ортогональные радиусы искривления свободной поверхности струи.

Особенности численной реализации математической модели во *FLOW-3D*®

Пакет *FLOW-3D*® имеет ряд особенностей численного решения задач гидродинамики, в том числе применительно к случаю распада струи рабочей жидкости на монодисперсные капли. Прежде всего, это использование для дискретизации расчетной области структурированной (прямоугольной) фиксированной сетки. К преимуществам использования такой сетки можно отнести простоту генерации и численной аппроксимации исходных уравнений, высокую численную точность их решения и низкое требование к объему оперативной памяти. Высокая точность описания сложной геометрии в такой сетке обеспечивается использованием специального алгоритма *FAVOR*™ (Fractional Area-Volume Obstacle Representation). Реальная поверхность геометрии (в нашем случае сопла) в пределах каждой расчетной ячейки, через которую она проходит, аппроксимируется плоской поверхностью. В сечении такая поверхность будет выглядеть как ломаная линия.

Для количественного описания поверхности вводятся дополнительные параметры (рис. 2): $V_f = V_{\text{open}}/V$ — доля свободного объема в полном объеме ячейки; $A_f = A_{\text{open}}/A$ — доля свободной площади грани ячейки в ее общей площади. Параметры V_f и A_f находятся для каждой расчетной ячейки и каждой ее грани.

При наличии движущегося твердого тела (ПЭП) уравнение неразрывности в (1) записывается следующим образом [4]:

$$\frac{V_f}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \nabla(\rho A_f \mathbf{U}) = -\frac{\partial V_f}{\partial t}. \quad (5)$$

Правая часть уравнения (5), отражающая эффект перемещения поверхности ПЭП в потоке рабочей жидкости, выражается через нормаль \mathbf{n} к этой поверхности и скорость $\mathbf{U}_{\text{ПЭП}}$ движения стенки ПЭП:

$$-\frac{\partial V_f}{\partial t} = (\mathbf{U}_{\text{ПЭП}} \cdot \mathbf{n}) S_{\text{ПЭП}}. \quad (6)$$

Здесь $S_{\text{ПЭП}}$ — площадь движущейся поверхности ПЭП (см. рис. 1) в расчетной ячейке, отнесенная к объему этой ячейки.

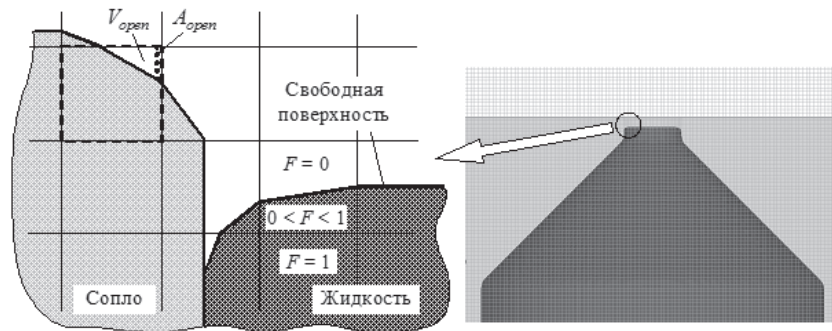


Рис. 2. Фрагмент расчетной области с соплом и жидкостью в исходном состоянии — схематическая иллюстрация к методам *FAVOR*TM и *VOF*

В задаче формирования монодисперсного потока каплей поверхность жидкости моделировали в рамках допущения одной струи жидкости со свободной поверхностью. Это допущение предполагает пренебрежение в системе “струя жидкости — воздух” второй, газовой, фазой и замену ее эквивалентным граничным условием на поверхности струи жидкости. Основанием для такого упрощения служит различие на три порядка плотностей жидкости и воздуха. В этом смысле поверхность жидкости свободна от влияния на нее окружающего газа (воздуха).

Если газовая фаза находится под давлением, а силы поверхностного натяжения оказывают влияние на характер течения жидкости, то граничное условие на свободной поверхности определяется как суммарное давление от этих двух факторов.

Численно свободная поверхность жидкости обрабатывается с помощью метода *volume-of-fluid (VOF)* [5]. Геометрически поверхность жидкости на прямоугольной сетке представляется как поверхность твердого тела, но количественно описывается по-другому. На дискретном пространстве расчетной области вводится скалярный параметр F , определяющий долю жидкости в расчетной ячейке (см. рис. 2). Этот параметр принимает значения 1,0 внутри жидкости и 0,0 — вне ее, а в ячейках со свободной поверхностью имеет промежуточные значения [2]. В общем случае при движении жидкости через расчетную область параметр F изменяется во времени и в пространстве. Для отслеживания этого изменения используется типовое уравнение переноса для скалярного параметра F

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (F\mathbf{U}) = 0. \quad (7)$$

В рамках *VOF*-метода выполняется приведение граничного давления на поверхности жидкости к давлению в объеме расчетных ячеек, содержащих эту поверхность. В дальнейших расчетах это приведенное давление используется как фиксированное граничное давление.

Уравнения системы (1) для их численного решения при соответствующих граничных условиях (2)–(4) с учетом свободной поверхности жидкости при наличии в расчетной области нескольких твердых тел, в том числе подвижных стенок ПЭП, записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{1}{V_f} (\mathbf{U} A_f \cdot \nabla \mathbf{U}) &= -\frac{1}{\rho} [\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{U}]; \\ \frac{V_f}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \nabla (\rho A_f \mathbf{U}) &= -\frac{\partial V_f}{\partial t}. \end{aligned} \quad (8)$$

Изменяется также уравнение переноса (6) для параметра F :

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \nabla (F \mathbf{U} A_f) = -\frac{F}{V_f} \frac{\partial V_f}{\partial t}. \quad (9)$$

Численное решение

Для численного решения уравнений (8), (9) во *FLOW-3D*[®] используется метод маркеров и ячеек (MAC), а точнее, одна из его разновидностей, предложенная Хиртом и Куком [6]. Для наглядности рассмотрим плоскую постановку задачи в декартовой системе координат и опустим коэффициенты, связанные со свободной поверхностью и твердым телом. Подробное описание численного решения можно найти в руководстве пользователя *FLOW-3D*[®].

Расчетная область задачи разделяется ортогональной фиксированной сеткой на множество ячеек — контрольных объемов. При этом различные зависимые переменные течения струи определяются на такой сетке в различных точках (в этом случае сетку называют разнесенной): давление — в центре ячеек (контрольных объемов), компоненты скорости — в центрах их граней (рис. 3).

Дифференциальные операторы уравнений математической модели аппроксимируются центральными конечными разностями. Уравнения Навье — Стокса, центрированные для соответствующих компонент скорости относительно точек $(i+1/2, k)$ и $(i, k+1/2)$, следующие:

$$\begin{aligned} \frac{u_{i+1/2,k}^{n+1} - u_{i+1/2,k}^n}{\Delta t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{p_{i+1,k}^{n+1} - p_{i,k}^{n+1}}{\Delta x} - \\ &- (FUX + FUZ + VISUX + VISUZ)_{i+1/2,k}^n; \\ \frac{\omega_{i,k+1/2}^{n+1} - \omega_{i,k+1/2}^n}{\Delta t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{p_{i,k+1}^{n+1} - p_{i,k}^{n+1}}{\Delta z} - \\ &- (FWX + FWZ + VISWX + VISWZ)_{i,k+1/2}^n. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь FUX, FUZ, FWX, FWZ и $VISUX, VISUZ, VISWX, VISWZ$ — соответственно конвективные и вязкие члены уравнений, в которых предпоследний символ аббревиатуры обозначает компоненту вектора скорости, а последний — направление, по которому выполняется дифференцирование (для упрощения дискретизация конвективных и вязких членов опущена). Система уравнений (10) записана в полужавной дискретной формулировке: давление входит в уравнения неявным образом, тогда как остальные члены — явным. Для решения таких систем необходимо привлечь дополнительное условие, в качестве которого выступает условие неразрывности. Дискретизированное уравнение нераз-

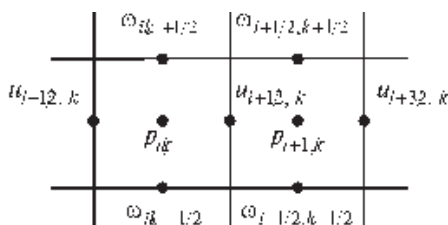


Рис. 3. Разнесенная расчетная сетка с компонентами скорости и давлением

рывности для временного шага $n+1$ (следующего за текущим) и центрированное относительно точки (i, k) записывается в виде

$$\frac{u_{i+1/2,k}^{n+1} - u_{i-1/2,k}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{\omega_{i,k+1/2}^{n+1} - \omega_{i,k-1/2}^{n+1}}{\Delta z} = 0. \quad (11)$$

Далее, согласно предложению Хирта и Кука [6], вводится некоторая промежуточная скорость U^* , определяемая из (10), но на основе поля давления на текущем временном шаге:

$$\begin{aligned} \frac{u_{i+1/2,k}^* - u_{i+1/2,k}^n}{\Delta t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{p_{i+1,k}^n - p_{i,k}^n}{\Delta x} - \\ &- (FUX + FUZ + VISUX + VISUZ)_{i+1/2,k}^n; \\ \frac{\omega_{i,k+1/2}^* - \omega_{i,k+1/2}^n}{\Delta t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{p_{i,k+1}^n - p_{i,k}^n}{\Delta z} - \\ &- (FWX + FWZ + VISWX + VISWZ)_{i,k+1/2}^n. \end{aligned} \quad (12)$$

Если вычесть из уравнений (10) уравнения (12), получим

$$\begin{aligned} \frac{u_{i+1/2,k}^{n+1} - u_{i+1/2,k}^*}{\Delta t} &= \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{p_{i+1,k}^{n+1} - p_{i+1,k}^n - (p_{i,k}^{n+1} - p_{i,k}^n)}{\Delta x}; \\ \frac{\omega_{i,k+1/2}^{n+1} - \omega_{i,k+1/2}^*}{\Delta t} &= \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{p_{i,k+1}^{n+1} - p_{i,k+1}^n - (p_{i,k}^{n+1} - p_{i,k}^n)}{\Delta z}. \end{aligned} \quad (13)$$

Теперь, подставляя U^{n+1} в соотношение (11), имеем

$$\nabla U^* - \frac{\Delta t}{\rho} \nabla^2 (p^{n+1} - p^n) = 0. \quad (14)$$

Для решения уравнения (14) авторы использовали один из нескольких доступных во *FLOW-3D*® методов, а именно метод обобщенных минимальных невязок GMRES (General Minimal RESiduals) [7]. Из (14) находим давление p^{n+1} и подставляем его в уравнение (13), а из него в свою очередь определяем скорость U^{n+1} . Этим завершается один цикл расчетов, в результате ко-



торого определяются неизвестные на шаге $n+1$ и согласованные между собой скорости и давления.

Далее выполняется переход к следующему временному шагу $n+2$.

Расчет продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто заданное время моделирования.

Результаты численного расчета.

Сравнение с экспериментальными данными

На основании изложенной выше численной схемы выполнено моделирование в программе *FLOW-3D*[®] процесса монодисперсного каплеобразования, результаты которого сопоставлены с имеющимися экспериментальными данными для дистиллированной воды, полученными при прочих равных условиях. В эксперименте дистиллированная вода истекает из формирующего сопла электрокаплеструйной головки диаметром 74 мкм под избыточным давлением 393000 Па со средней скоростью $v = 25$ м/с. Эти же параметры использовались в качестве базовых и при численных расчетах. Моделирование проводили для трех частот гармонических вынужденных возмущений f от пьезоэлектрического преобразователя — 21662, 37336 и 69210 Гц, для которых при амплитуде $A = 0,015$ м/с и нулевом фазовом сдвиге (см. выражение (3)) были получены экспериментальные данные. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных выполняли по параметру L — расстоянию от среза формирующего сопла до первой отрывающейся от струи капли в установившемся процессе каплеобразования.

На рис. 4 показаны картины распада струи дистиллированной воды на монодисперсные капли



Рис. 4. Распад струи жидкости на монодисперсные капли для $f = 69210$ Гц:
а — эксперимент; б — расчет

под действием вынужденных возмущений от ПЭП в эксперименте (рис. 4, а) и расчете (рис. 4, б) для $f = 69210$ Гц. Экспериментальные результаты получены с использованием стробоскопической приставки, позволяющей наблюдать неподвижную картину каплеобразования при частоте подаваемых синхронизирующих импульсов на электроды ПЭП и стробоскоп, которая равна частоте каплеобразования. В рассматриваемом случае (рис. 4, а) данная частота $f = 69210$ Гц. Следовательно, имеем частоту каплеобразования 69210 капель в секунду.

Как видно из рис. 4, частота каплеобразования как в эксперименте, так и в численном расчете равна частоте f вынужденных возмущений струи от ПЭП и составляет 69210 капель в секунду, а расстояние между монодисперсными каплями равно длине волны возмущения $\lambda = v / f$.

Как уже сказано, аналогичное численное моделирование было проведено и для частот вынужденных возмущений 21662 и 37336 Гц. О количественной адекватности используемой математической модели реальному процессу можно судить по рис. 5, на котором дано сравнение результатов расчета и эксперимента по параметру L для трех частот вынужденных возмущений 21662, 37336 и 69210 Гц. Результаты совпадают

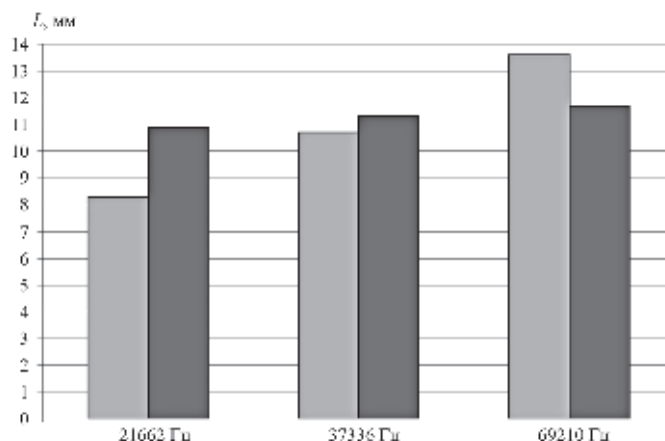


Рис. 5. Сравнение экспериментальных (левый столбец) и расчетных (правый столбец) значений длины L нераспавшейся части струи

с ошибкой в пределах от 5 до 23 %. Последнее можно считать вполне удовлетворительным с учетом того, что экспериментальные данные получены на реальной электрокаплеструйной головке, конструкция которой с ПЭП сложнее, чем это принято в расчетной схеме рис. 1. Учет конкретных конструктивных размещений ПЭП в электрокаплеструйной головке и их влияния на процессы каплеобразования будет предметом дальнейших исследований.

Соответствие результатов численного моделирования результатам экспериментальных исследований распада ламинарной струи на монодисперсные капли показывает адекватность расчетной модели реальному физическому процессу. Это позволяет в дальнейшем применить ее для других рабочих жидкостей электрокаплеструйных технологий с учетом конкретных конструктивных размещений ПЭП на электрокаплеструйной головке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нагорный, В.С.** Электрокаплеструйные регистрирующие устройства [Текст] / В.С. Нагорный. — Л.: Машиностроение, 1988. — 269 с.
2. **Вольнов, И.Н.** Моделирование литейных процессов— современные вычислительные технологии [Текст] / И.Н. Вольнов // Литейщик России. — 2007. — № 11. — С. 27–30.
3. **Лойцянский, Л.Г.** Механика жидкости и газа [Текст] / Л.Г. Лойцянский. — М.: Наука, 1978. — 736 с.
4. **Бархударов, М.** Моделирование литейных процессов с изменяемой геометрией [Текст] / М. Бархударов, Г. Вей // Литейщик России. — 2007. № 12. — С. 10–15.
5. **Hirt, C.W.** Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries [Текст] / C.W. Hirt, B.D. Nichols // J. Computational Physics. — 1981. Vol. 39. — P. 201–225.
6. **Флетчер, К.** Вычислительные методы в динамике жидкостей: Том 2 [Текст] / К. Флетчер. — М.: Мир, 1991. — 552 с.
7. **Баландин, М.Ю.** Методы решения СЛАУ большой размерности: Учеб. пособие [Текст] / М.Ю. Баландин, Э.П. Шурина. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. — 65 с.

УДК 621.515 (075.8)

К.В. Солдатова

УТОЧНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ПОТЕРЬ И НАПОРА В ПРОГРАММАХ МЕТОДА УНИВЕРСАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ*

Потребность промышленности в расширении номенклатуры центробежных компрессоров (ЦК) приводит к необходимости сокращения сроков проектирования. В связи с прогрессом экспериментальных и расчетных методов изменились методы проектирования, доводки и расчета характеристик компрессоров. В результате глубоких исследований проблемной лаборатории компрессоростроения [12–14] создан инженерный метод

расчета газодинамических характеристик и оптимального проектирования промышленных центробежных компрессоров [1] — Метод универсального моделирования [2–10, 12–14].

Комплекс программ Метода широко применяется на практике. С его помощью создано новое поколение центробежных нагнетателей и сменных проточных частей (СПЧ) для газовой и других отраслей промышленности. В промышленности работает более 300 центробежных компрессоров и СПЧ тридцати пяти типоразмеров общей установленной мощностью 4,3 млн кВт [14].

Как и в каждом инженерном методе, в программах используется ряд упрощающих допу-

* В работе использованы данные испытаний компрессоров, спроектированных профессором Ю.Б. Галёркиным с использованием Метода универсального моделирования.



щений и обобщенных с той или иной точностью экспериментальных данных. Несмотря на это, спроектированные Методом компрессоры обеспечивают заданные техническим заданием параметры по расходу и конечному давлению с высоким КПД. Моделирование характеристик во всем диапазоне производительности отличается меньшей точностью.

На рис. 1 в качестве примера сопоставлены газодинамические характеристики согласно проекту и измеренные при приемосдаточных испытаниях (ПСИ) компрессора ГПА-Ц-4А-76-1,7.

В расчетной точке отношение давлений по данным испытаний выше на 1,3 %, а измеренный КПД выше на 0,7 %, чем по проекту. Проектные данные более оптимистичны по максимальной достижимой величине отношения давлений и в отношении “запаса по помпажу”. По проекту $\bar{m}_{кр} / \bar{m}_{расч} = 0,666$, по данным испытаний — менее 0,5.

Представленный результат типичен в том смысле, что метод обеспечивает получение заданного отношения давлений в расчетной точке при КПД, равном или несколько большем, чем предсказанный математической моделью. В нерасчетных режимах отличие от рассчитанных характеристик в некоторых случаях довольно значительное, но фактическая зона работы обычно даже шире.

Повышение точности расчетов Методом универсального моделирования можно увеличить, если согласовать измеренные газодинамические характеристики выпускаемых промышленностью и тщательно испытанных центробежных компрессоров с характеристиками, рассчитанными Методом математического моделирования. Для этого нужно подобрать соответствующие эмпирические коэффициенты математических моделей расчета КПД и напора для каждого из анализируемых компрессоров и СПЧ. Следует добиться наилучшего совпадения характеристик по данным ПСИ и расчета с откорректированными коэффициентами, а именно по отношению давлений и КПД.

Корректировка эмпирических коэффициентов произведена с учетом структуры математических моделей в компьютерных программах Метода. Сопоставление измеренных и рассчитанных характеристик произведено с учетом следующих обстоятельств. Политропный напор

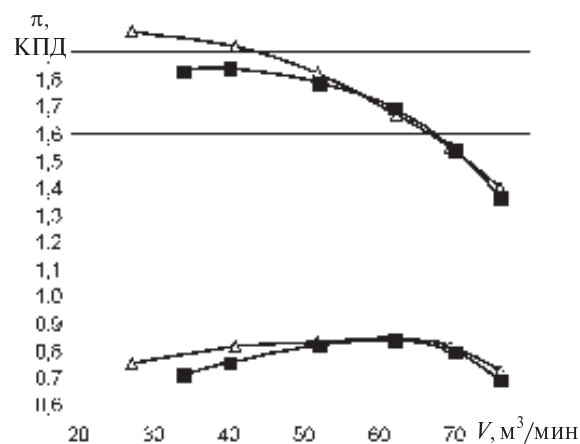


Рис. 1. Сопоставление газодинамических характеристик (1, 2 — отношение давлений π , 3, 4 — КПД) компрессора ГПА-Ц-4А-76-1,7:
■ — проект, Δ — данные испытаний

определяется измеренным отношением давлений. Затраченный напор измеряется по повышению температуры газа, поэтому моделирование должно обеспечить совпадение измеренного и рассчитанного повышения температуры.

Для решения задачи имеются данные заводских испытаний 16 компрессоров и СПЧ с числом ступеней 2–8, всего 49 ступеней. Центробежные компрессоры и СПЧ перекрывают широкий диапазон параметров попроизводительности $\bar{V}_H = 30\text{--}585 \text{ м}^3/\text{мин}$ и отношению давлений $\pi = 1,315\text{--}3,327$ при конечном давлении $p_k = 2,8\text{--}15 \text{ МПа}$ и эффективной мощности $N_e = 4,5\text{--}25 \text{ МВт}$.

Модель напора в Метод универсального моделирования содержит формулы, предложенные авторами монографии [11], и два эмпирических коэффициента, которые позволяют рассчитать напор в расчетной точке (коэффициент K_μ) и наклон линейной напорной характеристики (коэффициент $X_{\psi_{T0}}$). В большинстве случаев надлежащий подбор коэффициентов K_μ и $X_{\psi_{T0}}$ обеспечивает высокую точность моделирования.

Для моделирования характеристики КПД и отношения давлений необходимо рассчитать потери напора Методом универсального моделирования. При этом основной принцип — суммирование потерь по месту их возникновения. Так, потери в компрессоре складываются из суммы

потерь во входном патрубке и в ступенях. При суммировании потерь следует иметь в виду возможность взаимного влияния элементов проточной части друг на друга.

Взаимное влияние последовательно расположенных центробежных ступеней практически отсутствует при выполнении определенных приемов проектирования межступенчатых переходных каналов [2]. При делении ступени на основные элементы (РК — рабочее колесо, ЛД — лопаточный диффузор, БЛД — безлопаточный диффузор, диффузор, ОНА — обратно-направляющий аппарат) взаимное влияние учитывается приближенно.

Принцип моделирования потерь напора в элементах проточной части можно пояснить на примере РК. В основе моделирования лежит физическая модель течения, разработанная на основе тщательных исследований течения внутри РК [11], которые говорят о следующем:

на ограничивающих поверхностях пограничные слои — тонкие благодаря воздействию кориолисова ускорения на вторичные течения. Это увеличивает потери трения, но предотвращает отрыв потока;

на передней поверхности лопаток пограничные слои имеют большую толщину и сильно турбулизированы благодаря воздействию сил инерции, действующих по нормали к поверхности лопаток. Это увеличивает потери трения. Но пневмометрические измерения и визуализация показали отсутствие развитого отрыва потока во всем диапазоне характеристик ступени;

на задней поверхности лопаток пограничные слои имеют большую толщину и ламинаризованы благодаря воздействию сил инерции, действующих по нормали к поверхности лопаток. Это уменьшает потери трения, но своеобразная форма отрыва потока — след — возникает при замедлении, меньшем, чем в обычном диффузоре;

до образования следа на задней поверхности невязкая диаграмма скоростей на лопатках весьма близка к действительной. После образования следа скорость в ядре потока, равная скорости в точке отрыва, остается постоянной до выхода из РК. На передней поверхности после отрыва потока скорость растет. Вихревые потери проявляются в форме смещения ядра потока с вихревой зоной. При обтекании пластинки пограничный слой на поверхности соседствует с невязким потоком.

В отличие от пластинки поток обтекает поверхности каналов РК с замедлением, что следует

учитывать при расчете коэффициента силы трения. Градиент скорости по нормали к поверхности лопатки тоже должен быть принят во внимание. Турбулизация пограничного слоя на передней поверхности лопаток и его ламинаризация на задней поверхности вызываются силой инерции, действующей по нормали к потоку. Эта сила возникает при отклонении потока лопатками от инерциального направления и вызывает появление нормального градиента скорости. Процесс ламинаризации/турбулизации пограничного слоя на лопатках характеризуется числом Россби. При положительном значении Ro на задней поверхности лопаток подавляются поперечные турбулентные пульсации, и пограничный слой приобретает свойства ламинарного. При этом касательные напряжения уменьшаются, что приводит к отрыву потока даже при относительно небольшом замедлении. При отрицательном значении Ro на передней поверхности лопаток усиливаются поперечные турбулентные пульсации. При этом касательные напряжения возрастают, что препятствует отрыву потока даже при максимальных углах атаки, но ведет к росту потерь трения. Перечисленные явления необходимо учитывать. Для этого в модель потерь введено условное число Россби Ro' , в котором параметры пограничного слоя не участвуют. Такой подход соответствует принципу построения модели для массовых оптимизационных расчетов. Ro' учитывает роль нормальных сил инерции, представляя собой безразмерный градиент скорости.

Для учета отличий в обтекании пластинки и поверхности лопаток введены поправочные коэффициенты, зависящие от рассмотренных параметров.

Для учета реального характера возникновения ударных потерь, в том числе влияния сжимаемости, введены эмпирические коэффициенты. Для расчета характеристик остальных элементов проточной части используются подходы, соответствующие особенностям их рабочего процесса. Всего в модели потерь более трех десятков эмпирических коэффициентов X . Поскольку по принципу построения модели значения этих коэффициентов должны быть одинаковыми для всех ступеней ЦК вне зависимости от формы их проточной части, при правильно выбранных значениях коэффициентов X рассчитанные характеристики должны соответствовать



результатам испытаний. При этом необходимо учитывать упрощенный и отчасти произвольный характер модели. Полного совпадения результатов расчетов и экспериментов не должно быть в принципе. Однако модель можно считать адекватной, если ее погрешность соответствует требованиям практики проектирования и расчетов.

Для расчета профильных потерь напора необходима информация о скоростях потока на задней и передней поверхности лопаток. Для этого используется схематизированная диаграмма поверхностных скоростей, основанная на следующей информации:

- о относительных скоростях на входе и выходе рабочего колеса, определенных при выборе размеров входа и выхода лопаточной решетки;

- о средней нагрузке, определенной при выборе числа лопаток;

- о характере распределения скоростей вдоль лопатки.

Расчет потерь ударных потерь на нерасчетных режимах производится по схеме “потери в канале + входные потери”.

При анализе соответствия/несоответствия данных испытания и расчетов следует учитывать неизбежный “разброс” экспериментальных точек относительно плавных кривых газодинамических характеристик. При подборе эмпирических коэффициентов отдавалось предпочтение тем значениям, при которых рассчитанные характеристики проходили ниже измеренных значений КПД и отношения давлений.

В процессе согласования расчетных данных с результатами ПСИ компрессоров и СПЧ подбирались нужные значения следующих эмпирических коэффициентов: двух коэффициентов, моделирующих напорную характеристику; коэффициента потерь поверхностного трения; коэффициента потерь смещения (потерь отрыва потока); коэффициентов ударных потерь при расходах меньше расчетного; коэффициентов ударных потерь при расходах больше расчетного; коэффициента потерь из-за неравномерности структуры потока на входе в последующие элементы.

На рис. 2 приведен пример сопоставления измеренных и рассчитанных характеристик после корректировки эмпирических коэффициентов для компрессора ГПА-Ц-4А-76-1,7. Для всех 16 ЦК и СПЧ получена хорошая корреляция.

Полученный результат повышает надежность расчета характеристик компрессоров,

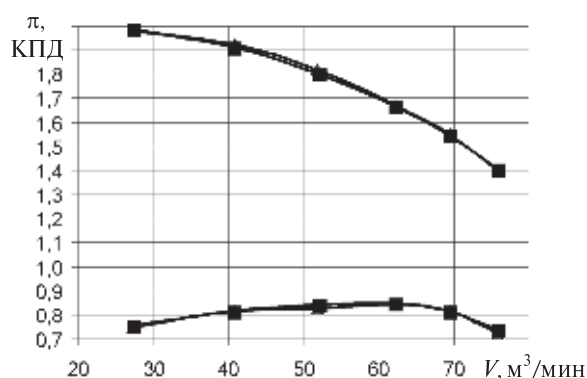


Рис. 2. Сравнение газодинамических характеристик (1, 2 — отношение давлений π , 3, 4 — КПД) компрессора ГПА-Ц-4А-76-1,7: ■ — расчет по откорректированной модели потерь и напора, Δ — данные испытаний

проектируемых Методом универсального моделирования. Дополнительный результат заключается в том, что точность расчета характеристик компрессора с большой степенью вероятности гарантирует соответствие действительных характеристик ступеней и полученных расчетом по откорректированным коэффициентам, что позволяет использовать ступени испытанных ЦК как модельные ступени при создании новых машин, хотя испытания собственно этих ступеней не проводились. Для таких ступеней используется термин “виртуальные модельные ступени”.

Рассчитаны характеристики:

- первых ступеней шестнадцати ЦК и СПЧ с учетом входного патрубка (“всасывающая ступень”);

- первых ступеней шестнадцати ЦК и СПЧ без учета входного патрубка (“промежуточная ступень”);

- тридцати трех промежуточных ступеней;

- последних ступеней шестнадцати ЦК и СПЧ с кольцевыми сборными камерами (“концевая ступень”).

Всего получены расчетные характеристики 81 ступени с безлопаточными и лопаточными диффузорами. Параметры проектирования этих ступеней лежат в широком диапазоне: коэффициент расхода — $\Phi_{\text{опт}} = 0,25-0,064$; коэффициент напора — $\psi_{\text{опт}} = 0,401-0,849$; втулочное отношение — $D_{\text{вт}} / D_2 = 0,258-0,483$; радиальная протяженность диффузора — $D_4 / D_2 = 1,316-$

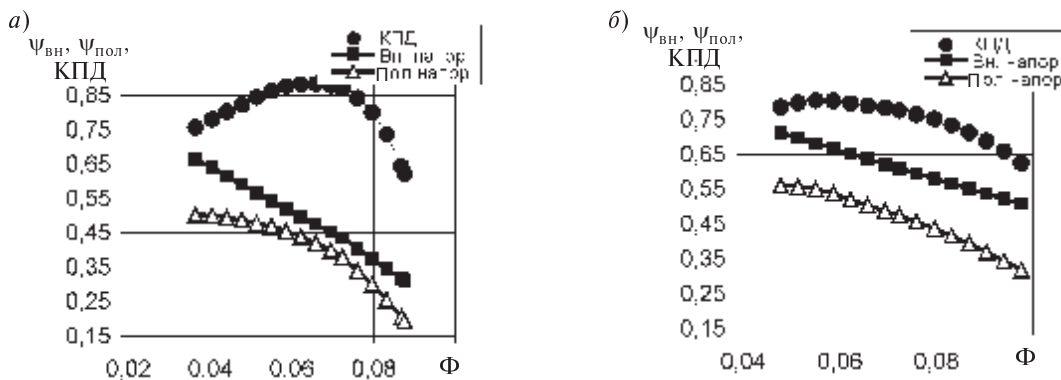


Рис. 3. Сопоставление газодинамических характеристик модельной ступени нового поколения П059/508 (а) и лицензионной ступени П063/638 (б) фирмы “Кларк” (США): Δ — $\psi_{\text{пол}}$; \bullet — η ; \blacksquare — $\psi_{\text{вн}}$

1,720. Наибольший КПД — почти 89 % — рассчитан у ступени с наиболее благоприятными параметрами проектирования — умеренным коэффициентом расхода $\Phi_{\text{опт}} = 0,052$ и небольшим коэффициентом напора $\psi_{\text{топт}} = 0,521$ при достаточно протяженном безлопаточном диффузоре $D_4 / D_2 = 1,720$.

Технический уровень модельных ступеней нового поколения в сравнении со старыми образцами демонстрируют графики на рис. 3.

На рис. 4 для примера показаны характеристики нескольких виртуальных ступеней.

Разработанный банк данных для состава 81 виртуальной ступени позволяет существенно повысить надежность газодинамического про-

ектирования и практически избежать ошибок. Достигнутый КПД ступеней с оптимальным сочетанием параметров проектирования и радикальных размеров составляет около 90 %, что практически является границей возможного, так как потери трения газа о поверхности проточной части и внутренние протечки нельзя свести к нулю ни в каком случае. Зона устойчивой работы ступеней также достигла рекордной ширины.

Использование банка данных физических и виртуальных модельных ступеней повышает надежность газодинамического проектирования центробежных компрессоров для современных и перспективных промышленных установок.

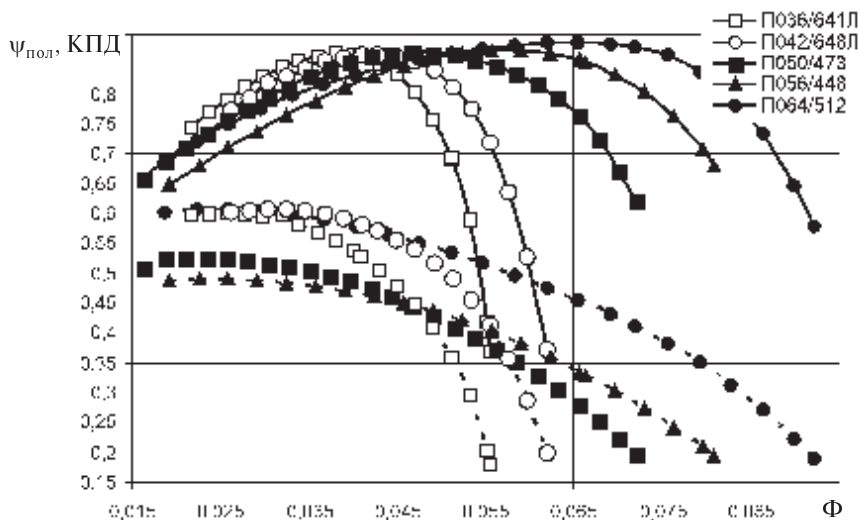


Рис. 4. Безразмерные характеристики нескольких виртуальных ступеней:
— — КПД η , - - - коэффициент политропного напора $\psi_{\text{пол}}$

ПРИЛОЖЕНИЕ

В табл. 1 представлены неполные данные, которыми располагала кафедра КВХТ на конец 2009 года [3, 5].

Таблица 1

**Газодинамические проекты кафедры КВХТ СПбГПУ
реализованные в компрессорах газовой промышленности
(ОАО «Компрессорный комплекс», СМПО им. Фрунзе, ОАО НПО «Искра»)**

№ п/п	Название компрессора/СПЧ	Место установки	Заказчик	Кол-во, шт.
1	ГПА-Ц-6,3/1-2,2	Кавказтрансгаз	СМПО им. Фрунзе	4
2	ГПА-Ц-8/160-2,4	Югтрансгаз	СМПО им. Фрунзе	4
3	ГПА-Ц-16/21-2,2	Кавказтрансгаз	СМПО им. Фрунзе	6
4	ГПА-Ц-16/41-2,2	Кавказтрансгаз	СМПО им. Фрунзе	6
5	ГПА-Ц-16/76-1,7	Ямбурггаздобыча, Надымгазпром	СМПО им. Фрунзе	33
6	ГПА-Ц-16/85-1,5	Белтрансгаз	СМПО им. Фрунзе	5
7	ГПА-Ц-16/100-1,7	Львовтрансгаз	СМПО им. Фрунзе	5
8	СПЧ-10/32к-2,0	Оренбурггазпром	СМПО им. Фрунзе	4
9	ГПА-Ц-6,3/29В-1,7	Львовтрансгаз	СМПО им. Фрунзе	3
10	ГПА-Ц-6,3/41С-1,7	Киевтрансгаз	СМПО им. Фрунзе	7
11	ГПА-Ц-6,3/64С-1,7	Киевтрансгаз	СМПО им. Фрунзе	3
12	ГПА-Ц-6,3/71	Турция	СМПО им. Фрунзе	4
13	ГПА-8/71-1,45...1,25	Аргентина	СМПО им. Фрунзе	2
14	ЭГПА-6,3/32к-2,2	Оренбурггазпром	СМПО им. Фрунзе	4
15	ГПА-Ц-16/76-1,25	Пермьтрансгаз	СМПО им. Фрунзе	4
16	ГПА-Ц-16/76-1,5	Тюментрансгаз, Уренгойгазпром, Пермьтрансгаз	СМПО им. Фрунзе	88
17	ГПА-Ц-16/56-1,7	Уренгойгаздобыча	СМПО им. Фрунзе	30
18	ГПА-Ц-16/45-1,7	Ямбурггаздобыча	СМПО им. Фрунзе	12
19	ГПА-Ц-16/45-1,7	ГПА-Ц-16 «Урал»	СМПО им. Фрунзе	5
20	СПЧ-6,3/61-1,27	Мострансгаз	СМПО им. Фрунзе	3
21	ГЦ1-285/3,5-10,7	КС Анастасьевка	СМПО им. Фрунзе	3
22	ГЦ1-470/1,1-5,7	КС Гнедицы	СМПО им. Фрунзе	3
23	ГЦ1- 680/1,5-4,5	КС Качановка	СМПО им. Фрунзе	3
24	ГПА-Ц-16/76-1,6	КС Сивас	СМПО им. Фрунзе	н/д*
25	108-51-1Л ГПА-10ДКС «Урал»	Уренгойгазпром	ОАО «Компрессорный комплекс»	10
26	СПЧ 108-71-1Л ГПА-10ДКС «Урал»	Уренгойгазпром	ОАО «Компрессорный комплекс»	н/д
27	СПЧ 108-81-1Л ГПА-10ДКС «Урал»	Уренгойгазпром	ОАО «Компрессорный комплекс»	н/д
28	398-23-1Л ГПА-16УТГ «Урал»	Уралтрансгаз	ОАО «Компрессорный комплекс»	4

Окончание табл. 1

№ п/п	Название компрессора/СПЧ	Место установки	Заказчик	Кол-во, шт.
29	398-27-1Л ГПА-16 «Урал»-02	Волгатрансгаз	ОАО «Компрессорный комплекс»	11
30	СПЧ 235-28-1	Волгатрансгаз	ОАО «Компрессорный комплекс»	н/д
31	СПЧ 650-1,37/76 ГПА-25-ПС «Урал»	Пермьтрансгаз	ОАО «Компрессорный комплекс»	1
32	48-61-1 ГПА-4ПХГ «Урал»	Мострансгаз	ОАО «Компрессорный комплекс»	1
33	СПЧ НЦ-18/70-1,7 ГПА-Ц-18	Тюментрансгаз	ОАО «Компрессорный комплекс»	4
34	НЦ-16/76-1,44 «Урал»	Севергазпром	ОАО НПО «Искра»	1
35	СПЧ НЦ-16/76-1,44	Пермьтрансгаз	ОАО НПО «Искра»	2
36	СПЧ 16/73-1,35	Тюментрансгаз	ОАО НПО «Искра»	1
37	СПЧ 16/76-1,64	Тюментрансгаз	ОАО НПО «Искра»	2
38	НЦ-16М/76-1,44	Самаратрансгаз	ОАО НПО «Искра»	1
39	ПА-Ц-4А/76-1,7	КС «Замьяны»	СМПО им. Фрунзе	н/д

н/д* — нет данных.

В 2005–2009 годах с помощью Метода универсального моделирования созданы проекты и выпущены промышленностью турбохолодильные агрегаты для газовой промышленности с одноступенчатыми центробежными компрессорами (табл. 2) [3, 5].

Таблица 2

**Перечень компрессоров турбохолодильных агрегатов,
выполненных с помощью Метода универсального моделирования
в 2005–2009 годах**

Компрессор	Параметры					Место установки
	m , кг/с	p_k , МПа	π	n , об/мин	Число, шт.	
ТК-1*	59	11,8	1,311	15500	1	ООО «Газпром добыча Ямбург»
ТК-2	79	8,0	1,333	15500	1	ООО «Газпром добыча Ямбург»
ТК-3	78.1	8,906	1,22	12000	10	ООО «Газпром добыча Уренгой»
ТК-4	79	6,75	1,424	18000	10	ООО «Газпром добыча Надым»
ТК-4а	79	6,75	1,424	14500	1	ООО «Газпром добыча Надым» (опытный образец)



Окончание табл. 1

Компрессор	Параметры					Место установки
	m , кг/с	p_k , МПа	π	n , об/мин	Число, шт.	
ТК-5	77,7	7,75	1,277	16000	10	ООО «Газпром добыча Надьм»
ТК-6	163	8,69	1,070	5300	11	ОАО «Новотэк»
ТК-7	86,3	13	1,209	18000	6	ОАО «Новотэк»
ТК-8	59,19	13	1,209	18000	4	ОАО «Лукойл»
ТК-3а	59	8	1.12	12000	4	ООО «Газпром добыча Ямбург»
ТК-8а	59	10.8	1.18	16000	1	ООО «Газпром добыча Ямбург»
ТГ-1**	160	8,27/7,76	1,066	8000	н/д	нет данных

*Изготовитель — ОАО «Турбохолод».

** Изготовитель — ОАО «Турбогаз».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Васильев, Ю.С.** Высокоэффективные центробежные компрессоры нового поколения [Текст] / Ю.С. Васильев, П.И. Родионов, М.И. Соколовский.— Промышленность России.— 2000.— № 10—11.— С. 42—43.
2. **Галёркин, Ю.Б.** О влиянии объемных потерь на характеристики центробежных компрессоров. Анализ на Базе нового варианта метода универсального моделирования (на примере нагнетателей ГПА). Часть 1. [Текст] / Ю.Б. Галёркин, К.А. Данилов, Е.Ю. Попова.— Компрессорная техника и пневматика.— 2003.— № 1.
3. **Галёркин, Ю.Б.** Новое поколение модельных ступеней для газодинамического проектирования центробежных компрессоров и сменных проточных частей. Часть 1. [Текст] / Ю.Б. Галёркин, К.В. Солдатова.— Компрессорная техника и пневматика.— 2010.— № 2.— С. 2—11.
4. **Галёркин, Ю.Б.** Новое поколение модельных ступеней для газодинамического проектирования центробежных компрессоров и сменных проточных частей. Часть 2. [Текст] / Ю.Б. Галёркин, К.В. Солдатова.— Компрессорная техника и пневматика.— 2010.— № 3.— С. 15—22.
5. **Галёркин, Ю.Б.** Снижение энергопотребления при транспортировке газа за счет оптимизации газодинамических характеристик центробежных компрессоров газоперекачивающих агрегатов (ГПА) [Текст] / Ю.Б. Галёркин, К.В. Солдатова / Труды междунар. научно-техн. конгр. «Энергетика в глобальном мире».— Красноярск, 16—18 июня. 2010.— С. 241—242.
6. **Галёркин, Ю.Б.** Численное моделирование центробежных компрессорных ступеней (физические основы, современное состояние) [Текст] / Ю.Б. Галёркин, К.А. Данилов, Е.Ю. Попова.— Компрессорная техника и пневматика. Вып. 2. / АСКОМП.— СПб., 1993.
7. **Галёркин, Ю.Б.** Развитие Метода универсального моделирования рабочего процесса ЦК—программные комплексы первого уровня (третье поколение), опыт разработки и практического использования комплекса третьего уровня [Текст] / Ю.Б. Галёркин, К.А. Данилов, Е.Ю. Попова.— СПб., 1995.
8. **Галёркин, Ю.Б.** Промышленные центробежные компрессоры,— физические основы рабочего процесса, применение численных методов для решения задач оптимального проектирования и оптимальной эксплуатации [Текст] / Ю.Б. Галёркин, Е.Ю. Попова.— СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1994.— 79 с.
9. **Галёркин, Ю.Б.** Физические и численные эксперименты по исследованию течения в рабочем колесе промышленного центробежного компрессора [Текст] / Ю.Б. Галёркин, М. Геллер, В.П. Митрофанов, А. Тевс // Труды VI междунар. симп. «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования» СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2000.— С. 65—70.
10. **Галёркин, Ю.Б.** Создание Метода универсального моделирования [Текст] / Ю.Б. Галёркин // Труды научно-техн. конф. «Промышленные центробежные компрессоры. Исследование и разработка».— СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2003.— С. 56—63.

11. Селезнев, К.П. Центробежные компрессоры [Текст] / К.П. Селезнев, Ю.Б. Галёркин.— Л.: Машиностроение, 1982.

12. Труды научной школы компрессоростроения СПбГПУ [Текст] / Под ред. Ю.Б. Галёркина.— М.: Изд-во «КХТ», 2000.

13. Труды научной школы компрессоростроения СПбГПУ [Текст] / Под ред. Ю.Б. Галёркина.— М.: Изд-во «КХТ», 2005.

14. Труды научной школы компрессоростроения СПбГПУ [Текст] / Под ред. Ю.Б. Галёркина.— М.: Изд-во «КХТ», 2010.

УДК 533.924

*В.Я. Фролов, В.А. Кархин,
С.Г. Зверев, Д.В. Иванов*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ПОРОШКА В ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Одна из наиболее широких областей (применения) плазменных технологий — обработка дисперсных материалов в плазменных струях и потоках. Сложность экспериментального исследования системы “плазменный поток — дисперсный материал” обусловила создание математических моделей, описывающих движение, теплообмен и физико-химические превращения дисперсных материалов в плазме.

В большинстве случаев нагрев дисперсных материалов определяется интенсивностью теплообмена частиц с набегающим потоком плазмы. В зависимости от размера одни частицы успевают лишь нагреться до определенной температуры, другие расплавляются, а наиболее мелкие полностью испаряются. Изучение процесса испарения мелкодисперсного порошка в плазменной струе необходимо для развития технологий получения наноматериалов.

Исследование влияния на процесс получения нанодиоксида титана характера ввода (угол к оси потока плазмы) исходного вещества

В ходе проведения математического моделирования процессов движения, нагревания и испарения частиц порошкового материала в плазме проанализировано влияние условий ввода частиц, а именно места и угла их подачи в плазменную струю, начальной скорости и диаметра; проведена расчетная оценка производительности плазменной струи с учетом массовой загрузки

ки дисперсными частицами, а также установлены размеры реактора и длина струи плазмы, необходимые для полного испарения частиц при получении нанодиоксида титана (рис. 1).

Движение одиночной частицы в плазме. Движение частиц в потоке плазмы подчиняется второму закону Ньютона, который для общего случая движения частицы в потоке может быть записан следующим образом [1]:

$$m_s \frac{d\vec{v}_s}{dt} = \sum_i \vec{F}_i = \vec{F}_D + \vec{F}_p + \vec{F}_B + \vec{F}_r + \vec{F}_{TH} + \vec{F}_e, \quad (1)$$

где m_s — масса частицы, кг; \vec{v}_s — скорость частицы, м/с; \vec{F}_D — сила газодинамического напора плазмы, Н; \vec{F}_p — сила, возникающая вследствие градиента давления в граничном слое, окружающем частицу, Н; \vec{F}_B — сила Бассета, Н; \vec{F}_r — сила, связанная с вращением частицы, Н; \vec{F}_{TH} — сила термофореза, Н; \vec{F}_e — внешние силы, Н; t — время, с.

Как показано в [1, 2], наибольшее влияние на движение частицы в плазме оказывает сила газодинамического напора \vec{F}_D . Кроме того, для частиц малого размера (< 10 мкм) значительное влияние оказывает сила термофореза [2]. Из внешних сил, действующих на частицу, рассматриваем только силу тяжести. В случае плазменного потока, плотность которого значительно ниже плотности частицы, остальные силы

$(\vec{F}_p, \vec{F}_B, \vec{F}_r)$, действующие на частицу в потоке, часто пренебрежимо малы.

Таким образом, для частицы в потоке плазмы второй закон Ньютона (1) выглядит следующим образом:

$$m_s \frac{d\vec{v}_s}{dt} = \vec{F}_D + \vec{F}_{TH} + \vec{F}_g,$$

где $\vec{F}_g = m_s \vec{g}$ — сила тяжести, Н; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Сила газодинамического напора. Сила газодинамического напора определяется следующим образом [3]:

$$\vec{F}_D = \frac{1}{2} C_d \rho_p (\vec{v}_p - \vec{v}_s) |\vec{v}_p - \vec{v}_s| S_M,$$

где C_d — коэффициент лобового сопротивления; ρ_p — плотность плазмы, кг/м^3 ; \vec{v}_p — скорость плазмы, м/с ; \vec{v}_s — скорость частицы, м/с ;

$S_M = \frac{\pi d_s^2}{4}$ — миделево сечение плазмы, м^2 ; d_s — диаметр частицы, м .

Коэффициент лобового сопротивления. Коэффициент лобового сопротивления C_d обычно представляется в виде функции от числа Рейнольдса:

$$C_d = f(\text{Re}).$$

Число Рейнольдса определяется по следующей формуле:

$$\text{Re} = \frac{\rho_p |\vec{v}_s - \vec{v}_p| d_s}{\mu_p},$$

где μ_p — вязкость плазмы.

Существует большое количество полуэмпирических зависимостей коэффициента лобового сопротивления C_d от числа Рейнольдса [1, 3, 4].

В работе [5] было показано, что с экспериментальными данными хорошо согласуется формула, предложенная авторами работы [4]:

$$C_d = \frac{16,6}{\text{Re}^{0,75}} + 0,2. \quad (2)$$

Учет изменения свойств плазмы в пограничном слое. Обычно температура плазмы значительно больше температуры частицы. Поэтому температура плазмы резко падает в пограничном слое, окружающем частицу, и, как следствие, в пограничном слое происходит изменение

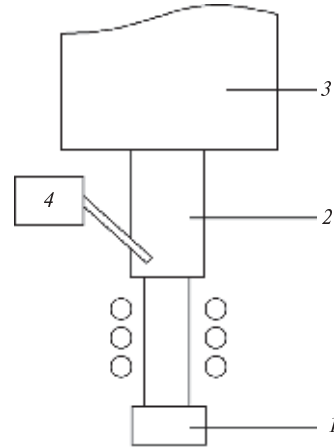


Рис. 1. Схема процесса испарения мелкодисперсного порошка в плазменной струе при получении наноматериалов:

1 — ВЧИ плазматрон; 2 — реактор; 3 — кристаллизатор; 4 — порошок

свойств плазмы. В работе [1] на основе анализа литературных данных предложена следующая формула для расчета C_d с учетом изменения свойств плазмы в пограничном слое:

$$C_d = C_{df} \left(\frac{\rho_p \mu_p}{\rho_{Ts} \mu_{Ts}} \right)^{-0,45},$$

где C_{df} — значение коэффициента C_d , рассчитанное по формуле (2), причем свойства отнесены к средней температуре пограничного слоя

$$T_f = \frac{T_s + T_p}{2}; \quad \rho_p \text{ и } \mu_p, \quad \rho_{Ts} \text{ и } \mu_{Ts} — \text{плотность}$$

и вязкость плазмы, отнесенные соответственно к температуре плазмы и частицы.

Учет нарушения сплошности среды. В ряде случаев плазменной обработки частиц средняя длина их свободного пробега в плазме имеет тот же порядок величины, что и размеры обрабатываемых частиц. Это справедливо для малых частиц ($< 10 \text{ мкм}$) в плазме атмосферного давления либо в случае плазмы пониженного давления и частиц большего диаметра.

В таких случаях допущение о сплошной среде недействительно, и в формуле для определения C_d необходимо учесть нарушение сплошности среды.

В работе [1] показана важность учета влияния этого фактора на число Кнудсена в преде-

лах его изменения $10^{-2} < \text{Kn} < 1$ и предложена следующая поправка к формуле определения C_d :

$$C_d = C_{d\text{con}} \left[1 + \left(\frac{2-a}{a} \right) \left(\frac{\gamma}{1+\gamma} \right) \frac{4}{\text{Pr}_s} \text{Kn}^* \right]^{-0,45},$$

где $C_{d\text{con}}$ — значение коэффициента C_d , рассчитанное по формуле (2); a — коэффициент теплового согласования; γ — отношение теплоемкостей при постоянном давлении и объеме; Pr_s — число Прандтля плазмы, отнесенное к температуре частицы; Kn^* — число Кнудсена, основанное на эффективной средней длине свободного пробега.

Для аргоновой плазмы $a = 0,8$, $\gamma = 1,667$ [1].

Число Прандтля плазмы определяется по формуле

$$\text{Pr} = \frac{\mu_p c_{p_p}}{\lambda_p}.$$

Число Кнудсена Kn^* , основанное на эффективной средней длине свободного пробега, определяется выражением

$$\text{Kn}^* = \frac{l^*}{d_s},$$

где l^* — эффективная средняя длина свободного пробега в плазме, которая выражается следующим образом:

$$l^* = \frac{2\bar{\lambda}}{\rho_{Ts} \bar{v}_s \bar{c}_p} \text{Pr}_s,$$

$\bar{\lambda}$ — усредненная теплопроводность плазмы, Вт/(м·К):

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{T_p - T_s} \int_{T_s}^{T_p} \lambda dT;$$

\bar{c}_p — усредненная теплоемкость плазмы, Дж/(кг·К):

$$\bar{c}_p = \frac{1}{T_p - T_s} \int_{T_s}^{T_p} c_p dT;$$

\bar{v}_s — средняя тепловая скорость плазмы при температуре частицы T_s , м/с.

Учет испарения. Влияние испарения частицы на коэффициент лобового сопротивления еще мало изучено [1]. В первом приближении его можно учесть так:

$$C_{d\text{vap}} = C_{df} \frac{1}{1+B},$$

где C_{df} — коэффициент лобового сопротивления, вычисляемый по формуле (2); $B = (H_p - H_{Ts}) / \Delta H_{boil}$ — коэффициент теплоотдачи; H_p , H_{Ts} — энтальпии плазмы, отнесенные соответственно к температуре плазмы и температуре частицы, Дж/кг; ΔH_{boil} — удельная теплота парообразования материала частицы, Дж/кг.

Выражение для коэффициента лобового сопротивления. Формула для коэффициента лобового сопротивления C_d с учетом вышеперечисленных факторов имеет следующий вид:

$$C_d = C_{df} f_1 f_2 f_3,$$

где C_{df} вычисляется по формуле (2), причем свойства плазмы отнесены к средней температуре пограничного слоя T_f ; f_1 — поправка, учитывающая изменение свойств плазмы в пограничном слое, вычисляемая по формуле

$$f_1 = \left(\frac{\rho_p \mu_p}{\rho_s \mu_s} \right)^{-0,45};$$

f_2 — поправка на нарушение сплошности среды, определяемая выражением

$$f_2 = \left[1 + \left(\frac{2-a}{a} \right) \left(\frac{\gamma}{1+\gamma} \right) \frac{4}{\text{Pr}_s} \text{Kn}^* \right]^{-0,45};$$

f_3 — поправка, учитывающая влияние испарения; вычисляется как

$$f_3 = \frac{1}{1+B}.$$

Термофорез. Термофорез представляет собой силу, действующую на частицу в потоке плазмы и направленную из области с более высокой температурой в область с более низкой температурой. Эта сила существенно влияет на движение только очень мелких частиц (<5 мкм).

Формула Брока описывает термофорез во всем диапазоне чисел Кнудсена в случае постоянных свойств [1]:

$$\vec{F}_{TH} = - \frac{6\pi\mu_f^2 d_s C_s \left(\frac{\lambda_f}{\lambda_s} + 2C_t \frac{l^*}{d_s} \right)}{\rho_f \left(1 + 6C_m \frac{l^*}{d_s} \right) \left(1 + 2 \frac{\lambda_f}{\lambda_s} + 4C_t \frac{l^*}{d_s} \right)} \times$$

$$\times \frac{\text{grad } T_p}{T_p},$$

где λ_f — теплопроводность плазмы, отнесенная к средней температуре пограничного слоя, Вт/(м·К); λ_s — теплопроводность частицы, Вт/(м·К); T_p — температура плазмы, К; $C_t l^*$ — толщина теплового пограничного слоя, $C_t = 2,18$; $C_m l^*$ — толщина газодинамического пограничного слоя, $C_m = 1,14$; C_s — термический коэффициент скольжения, $C_s = 1,17$; ρ_f и μ_f — соответственно плотность и вязкость плазмы, отнесенные к средней температуре пограничного слоя.

Нагревание одиночной частицы в плазме. Основные допущения, принимаемые при расчете нагрева частиц в плазменной струе: частица нагревается равномерно, как хорошо теплопроводящее тело, т. е. температура поверхности частицы равна температуре в ее центре; давление в плазме 1 атм; температура кипения относится к этому давлению; пренебрегают изменением свойств плазмы в пограничном слое вокруг частицы, происходящем вследствие испарения частицы; теплофизические свойства считают постоянными для частицы в твердом состоянии и зависящими от температуры для частицы в жидком состоянии.

Нагрев частицы проходит последовательно следующие стадии (рис. 2):

I — нагревание твердой частицы до температуры плавления;

II — плавление частицы при постоянной температуре (температура плавления); вся энергия при этом идет на разрыв кристаллических связей;

III — нагревание жидкой капли до температуры кипения; на этой стадии частица теряет массу за счет процесса испарения;

IV — кипение частицы при постоянной температуре (температура кипения).

Безградиентное нагревание одиночной частицы в плазме подчиняется известной формуле, которая связывает скорость нагрева частицы

$\frac{dT_s}{dt}$ с ее массой m_s , удельной теплоемкостью c_{ps} и мощностью, передаваемой в частицу:

$$m_s c_{ps} \frac{dT_s}{dt} = \sum_i P_i, \quad (3)$$

где $\sum_i P_i$ — суммарная мощность, передаваемая в частицу, равная сумме мощностей всех рас-

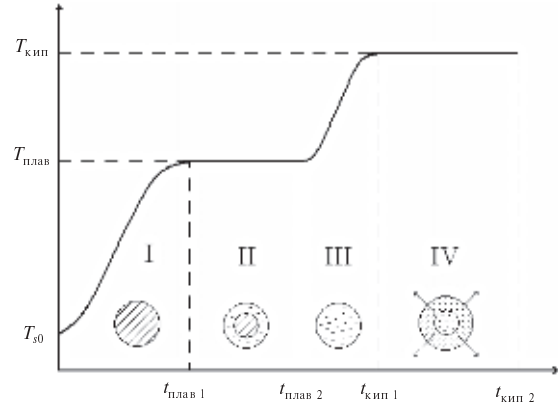


Рис. 2. Стадии нагрева частицы в плазме

считываемых (на данной стадии нагрева частицы) механизмов передачи энергии.

Нагревание твердой частицы до температуры плавления. На данной стадии происходит нагрев твердой частицы с постоянными свойствами до температуры плавления. Есть только один источник энергии — конвективно-кондуктивная теплопередача от плазмы — и один механизм потерь энергии — излучение с поверхности частицы. Баланс мощностей для частицы на данной стадии согласно (3) принимает следующий вид:

$$m_s c_{ps} \frac{dT_s}{dt} = P_p - P_{rad},$$

где P_p — мощность конвективно-кондуктивной теплопередачи от плазмы к частице, Вт; P_{rad} — мощность излучения частицы, Вт.

Плавление частицы. Плавление частицы происходит при постоянной температуре $\left(\frac{dT_s}{dt} = 0\right)$,

соответственно вся мощность, подводимая к частице, затрачивается на плавление. Формула (3) принимает следующий вид:

$$0 = P_p - P_{rad} - P_{melt}, \quad \text{или} \quad P_{melt} = P_p - P_{rad},$$

где P_{melt} — мощность, затрачиваемая на плавление частицы, Вт.

Нагревание жидкой капли до температуры кипения. Нагревание частицы до температуры кипения сопровождается дополнительными потерями энергии.

Первый механизм потерь энергии связан с потерями массы при испарении: масса несет в себе энергию, поэтому вместе с потерями ис-

парившейся массы происходят потери уносимой ею энергии.

Второй механизм: облако испаряемого пара поглощает часть энергии, передаваемой от плазмы к частице. Эта энергия идет на нагрев облака от температуры кипения до температуры плазмы.

Баланс мощностей для частицы на данной стадии нагрева записывается следующим образом:

$$m_s c_{ps} \frac{dT_s}{dt} = P_p - P_{rad} - P_{vap} - P_{cloud},$$

где P_{vap} — мощность, затрачиваемая на испарение (уносимая испарившейся массой), Вт; P_{cloud} — мощность, затрачиваемая на нагрев парового облака, Вт.

Кипение частицы. Кипение частицы происходит при постоянной температуре $\left(\frac{dT_s}{dt} = 0\right)$,

т. е. вся мощность, подводимая к частице от плазмы, затрачивается на кипение. Формула (3) принимает вид

$$0 = P_p - P_{rad} - P_{boil} - P_{cloud},$$

или

$$P_{boil} + P_{cloud} = P_p - P_{rad}, \quad (4)$$

где P_{boil} — мощность, затрачиваемая на кипение, Вт.

Механизмы передачи энергии

Рассмотрим различные механизмы передачи энергии при нагревании частицы в плазме.

Конвективно-кондуктивная теплопередача от плазмы. Конвективно-кондуктивная теплопередача от плазмы — это единственный (в данной модели) источник энергии для частицы. Мощность этого источника может быть определена по формуле Ньютона

$$P_p = \alpha (T_p - T_s) S_{пов},$$

где α — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);

$S_{пов} = \pi d_s^2$ — площадь поверхности частицы, м².

Коэффициент α связан с числом Нуссельта следующим образом:

$$\alpha = \text{Nu} \frac{\lambda_f}{d_s},$$

где λ_f — теплопроводность плазмы, отнесенная к средней температуре пограничного слоя, Вт/(м·К).

Число Нуссельта обычно выражают как функцию чисел Рейнольдса и Прандтля. Поток плазмы имеет свою особенность — большой градиент температуры в пограничном слое частицы, поэтому формула для расчета Nu должна быть скорректирована для случая плазмы. Для теплообмена между частицей и потоком плазмы авторы [6] рекомендуют следующую формулу:

$$\text{Nu} = 2 \frac{v_s \lambda_s}{v_p \lambda_p} + 0,6 \text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{0,33}. \quad (5)$$

При рассмотрении частиц малого диаметра (<20 мкм) необходимо также учитывать нарушение сплошности среды (плазмы). С учетом этого фактора формула для конвективно-кондуктивной теплопередачи от плазмы имеет вид [7]

$$P_p = P_{pcon} \left[1 + \left(\frac{2-a}{a} \right) \left(\frac{\gamma}{1+\gamma} \right) \frac{4}{\text{Pr}_s} \text{Kn}^* \right]^{-1}.$$

Таким образом, используемое в расчетах выражение для P_p будет следующим:

$$P_p = \text{Nu} \frac{\lambda_f}{d_s} (T_p - T_s) S_{пов} f_4,$$

где число Нуссельта Nu вычисляется по формуле (5), а поправка f_4 равна

$$f_4 = \left[1 + \left(\frac{2-a}{a} \right) \left(\frac{\gamma}{1+\gamma} \right) \frac{4}{\text{Pr}_s} \text{Kn}^* \right]^{-1}.$$

Излучение частицы. С поверхности частицы, нагретой до высокой температуры, идет излучение, при этом теряется энергия. Мощность P_{rad} излучения частицы может быть рассчитана по формуле

$$P_{rad} = \varepsilon \sigma T_s^4 S_{пов},$$

где ε — степень черноты (серости) материала частицы; σ — постоянная Стефана — Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт·м⁻²·К⁻⁴.

Плавнение частицы. Температура частицы при плавнении остается постоянной, и вся передаваемая ей энергия затрачивается на плавление. Мощность P_{melt} , затрачиваемая на плавление, определяется по следующей формуле:

$$P_{melt} = \Delta H_{melt} \dot{m}_{melt},$$

где ΔH_{melt} — удельная теплота плавления материала частицы, Дж/кг; $\dot{m}_{melt} = -\left(\frac{dm_s}{dt}\right)_{melt}$ — скорость плавления, кг/с.



Испарение частицы. При испарении частица теряет массу — пар диффундирует в плазму. Очевидно, что вместе с массой частица теряет и энергию — ту энергию, которую уносит пар. Мощность P_{vap} , затрачиваемая на испарение и затем уносимая паром, описывается формулой

$$P_{vap} = \Delta H_{boil} \dot{m}_{vap}, \quad (6)$$

где $\dot{m}_{vap} = -\left(\frac{dm_s}{dt}\right)_{vap}$ — скорость испарения, кг/с.

Кипение частицы. При кипении (так же как при испарении) частица теряет энергию — ту энергию, которую уносит пар. Мощность P_{boil} , затрачиваемая на кипение и затем уносимая паром, описывается следующей формулой:

$$P_{boil} = \Delta H_{boil} \cdot \dot{m}_{boil}, \quad (7)$$

где $\dot{m}_{boil} = -\left(\frac{dm_s}{dt}\right)_{boil}$ — скорость кипения, кг/с.

Необходимо заметить, что формулы (6) и (7) одинаковы по структуре, но скорость испарения \dot{m}_{vap} и скорость кипения \dot{m}_{boil} определяются различными способами в связи с различием механизмов испарения и кипения.

Нагрев парового облака. Образующийся в процессе испарения или кипения пар имеет температуру кипения. По мере своего диффузионного движения от частицы в пограничном слое пар нагревается до температуры плазмы. Мощность P_{cloud} , затрачиваемая на нагрев такого парового облака вокруг частицы, может быть вычислена по следующей формуле:

$$P_{cloud} = \dot{m}_{vap} \bar{c}_{p,vapor}(T_p)(T_p - T_{boil}), \quad (8)$$

где $\bar{c}_{p,vapor}(T_p) = \frac{1}{T_p - T_{boil}} \int_{T_{boil}}^{T_p} c_{p,vapor}(T) dT$ — сред-

няя теплоемкость пара при его нагреве от температуры кипения до температуры плазмы; $c_{p,vapor}(T)$ — теплоемкость образованного пара как функция температуры, Дж/(кг·К).

Физические процессы, сопровождаемые потерями массы. Как было сказано выше, испарение и кипение — это физические процессы, связанные с потерями массы.

Испарение можно определить как процесс массовых потерь, вызываемый разницей концентраций пара у поверхности частицы и в плазме. Этот процесс имеет место при температурах частицы, меньших температуры кипения.

Процесс испарения включает в себя две стадии:

1) выход молекул с поверхности частицы (жидкой капли). В жидкой капле, как в любой жидкости, происходит хаотическое (тепловое) движение молекул с определенным их распределением по скоростям. Частицы с наиболее высокой энергией (“хвост” функции распределения) преодолевают силы межмолекулярного взаимодействия и покидают поверхность частицы;

2) движение молекул от поверхности частицы в плазму, определяемое разницей концентраций пара у поверхности частицы и в плазме, т. е. происходит концентрационная диффузия молекул пара.

Кипение представляет собой процесс массовых потерь, при котором температура поверхности частицы равна температуре кипения. При этом образование пара происходит не только на поверхности, но и в теле частицы (“пузырьки”). Можно также сказать, что при нагревании частицы испарение переходит в кипение, когда парциальное давление пара на поверхности частицы (давление насыщенного пара) становится равным полному давлению плазмы, окружающей частицу (1 атм).

Потери массы при кипении. Потери массы при кипении полностью определяются балансом мощностей для частицы. Подставив в формулу (4) выражения (7) и (8), получаем следующую формулу для скорости кипения:

$$\dot{m}_{boil} = \frac{P_p - P_{rad}}{\Delta H_{boil} + \bar{c}_{p,vapor}(T_p)(T_p - T_{boil})}. \quad (9)$$

Потери массы при испарении. Скорость испарения может быть выражена так [8, 9]:

$$\dot{m}_{vap} = h_m S_{нов} p \ln \left(\frac{p}{p - p_v(T)} \right), \quad (10)$$

где h_m — коэффициент массообмена, с/м; p — полное давление плазмы, Па; $p_v(T)$ — парциальное давление пара на поверхности частицы (давление насыщенного пара, зависящее от температуры частицы), Па.

Коэффициент массообмена определяется формулой [9]

$$h_m = \text{Sh} \frac{D_f M}{RT_f d_s},$$

где Sh — число Шервуда; D_f — коэффициент взаимной диффузии материала частицы и плазмы при температуре T_f , $\text{м}^2/\text{с}$; M — молярная масса смеси в пограничном слое, $\text{кг}/\text{моль}$; R — газовая постоянная, $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{моль})$.

Используя аналогию между процессами тепло- и массообмена, для числа Шервуда, которое иногда называется диффузионным числом Нуссельта, можно записать выражение, аналогичное формуле Ранца — Маршалла [10]:

$$\text{Sh} = \underbrace{2}_{\text{диффузия}} + \underbrace{0,6 \text{Re}^{0,5} \text{Sc}^{0,33}}_{\text{конвекция}}, \quad (11)$$

где $\text{Sc} = \frac{\mu}{D_p}$ — число Шмидта, иногда называемое диффузионным числом Прандтля.

Подобно числу Нуссельта Nu , число Шервуда Sh содержит часть (в которую входит Re), выражающую конвективный массообмен; 2 в формуле (11) выражает массообмен за счет концентрационной диффузии.

Для случая частицы в плазме формулу (11) необходимо скорректировать. Авторами [11] предложен следующий корректирующий коэффициент:

$$\text{Sh} = \left(2 + 0,6 \text{Re}_f^{0,5} \text{Sc}_f^{0,33}\right) \times \left(\frac{\rho_p \mu_p}{\rho_{Ts} \mu_{Ts}}\right)^{0,6} \left(\frac{c_{pp}}{c_{pTs}}\right)^{0,38}. \quad (12)$$

Необходимо отметить, что в формуле (12) числа Re_f и Sc_f относятся к температуре T_f .

Коэффициент взаимной диффузии материала частицы и плазмы может быть рассчитан по формуле [12]

$$D = 2,628 \cdot 10^{-7} \sqrt{T^3 \frac{(M_1 + M_2)}{2M_1 M_2}} \frac{1}{p \sigma_{12}^2 \Omega_{12}^{(1,1)}(T_{12}^*)},$$

где p — давление, атм ; T — температура, К ;

$T_{12}^* = kT/\varepsilon_{12}$; $\sigma_{12} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$, и $\varepsilon_{12} = \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_2}$, К , — па-

раметры потенциальной энергии молекул, характеризующие их взаимодействие; M_1 и M_2 — молекулярные веса материала частицы и плазмы.

Функция $f(T)$. Давление $p_v(T)$ пара на поверхности частицы (давление насыщенного пара) очень мало при температуре, незначительно превышающей температуру плавления, и экспоненциально возрастает при температурах, близких к температуре кипения; при температуре кипения оно равно атмосферному давлению. Это значит, что при температурах, близких к тем-

пературе кипения, отношение $\frac{p}{p - p_v(T)}$ стано-

вится очень большим, и скорость испарения, вычисленная по формуле (10), начинает превышать скорость потерь массы при кипении (скорость кипения), которая, как представляется, есть предельно возможная скорость потерь массы. Более того, при температуре $T \rightarrow T_{boil}$ давление $p_v(T) \rightarrow p$ и потери массы, определяемые по формуле (10), становятся бесконечно большими: $\dot{m}_{vap} \rightarrow \infty$.

Поэтому для использования формулы (10) при $T \rightarrow T_{boil}$ авторы работы [7] предложили ограничить скорость испарения с помощью специальной функции: если скорость испарения, вычисленная по формуле (10), превышает некоторое максимальное значение

$$\dot{m}_{vap, \max} = f(T) \dot{m}_{boil},$$

то скорость испарения принимается равной этому максимальному значению. Здесь \dot{m}_{boil} — скорость кипения при той же мощности, передаваемой в частицу, при которой рассматривается скорость испарения.

Таким образом, функция $f(T)$ определяет, какую долю от скорости кипения (при данной мощности P , передаваемой в частицу) составляет максимальная скорость испарения (при той же мощности P).

Согласно [7] функция $f(T)$ лежит в следующих пределах:

$$0 \leq f(T) \leq 1.$$

В общем случае функция $f(T)$ может зависеть от температуры [7].

Если $f(T) = 1$, это значит, что максимальная скорость испарения соответствует скорости кипения, т. е. режиму, при котором нет изменения



температуры и вся мощность, поступающая в частицу, расходуется на испарение.

Если $f(T) = 0$, это значит, что процесс испарения не учитывается в расчетах.

Можно пойти немного дальше, чем авторы работы [7], и предположить, что функция $f(T)$ может превышать единицу. В результате при температурах, близких к температуре кипения, потери массы за счет испарения настолько велики, что потери мощности, связанные с потерей массы, превышают мощность, подводимую к частице, т. е. температура частицы уменьшается.

Таким образом, функция $f(T)$ представляет собой удобный механизм изучения модели нагревания частицы в плазме с учетом и без учета испарения.

Выражение потерь массы при испарении. Представляется, что наиболее близким к реальным физическим процессам будет определение скорости испарения по следующей формуле:

$$\dot{m} = \frac{\dot{m}_{vap} \dot{m}_{boil}}{\dot{m}_{vap} + \dot{m}_{boil}}, \quad (13)$$

где \dot{m}_{vap} — скорость испарения, определяемая по формуле (10); \dot{m}_{boil} — скорость кипения согласно формуле (9). При этом \dot{m}_{vap} и \dot{m}_{boil} должны вычисляться для мощности, передаваемой в частицу от плазмы.

Рассмотрим предельные случаи:

1) $T_{melt} < T_s \ll T_{boil}$. В этом случае $|\dot{m}_{vap}| \ll \ll |\dot{m}_{boil}|$, и согласно (13) будем иметь $\dot{m} \approx \dot{m}_{vap}$.

2) $T_s \approx T_{boil}$. В этом случае $|\dot{m}_{vap}| \gg |\dot{m}_{boil}|$, и согласно (13) будет $\dot{m} \approx \dot{m}_{boil}$.

Как видно, формула (13) дает правильную скорость испарения в двух предельных случаях; именно эта формула будет использоваться в расчетах.

Таким образом, было показано, что при исследовании поведения частицы в плазме необходимо рассматривать следующие процессы: движение частицы в потоке плазмы, передачу импульса от плазмы к частице, а также тепло- и массообмен между частицей и плазмой. Эти процессы описываются уравнениями (1), (3), (9), (10).

Результаты расчета частицы в потоке плазмы. В соответствии с рис. 1 подачу порошкового ма-

териала производят в зону заданной температуры сформированного факела плазмы.

Исследование проводилось в следующем режиме работы установки: мощность в аргоновой плазме — 30 кВт, расход приосевого потока газа — 10 л/мин, расход пристеночного потока газа — 90 л/мин.

В процессе исследований менялись следующие параметры, определяющие характер ввода исходного вещества в факел плазмы:

угол α между направлением подачи и положительным направлением оси потока плазмы;

расход транспортирующего газа (Ar) — в диапазоне от 0 до 5 л/мин;

расход порошка диоксида титана — в диапазоне от 0,1 до 5 кг/ч;

расстояние от торца шихтоввода (водоохлаждаемая трубка, через которую подается исходный порошок) до оси факела плазмы.

В исследованиях использовался способ подачи порошка против потока — угол α между направлением подачи и положительным направлением оси потока плазмы был равен или превышал 90° . Это связано с тем, что при таком способе достигается наибольшая производительность работы установки (может быть подан больший расход порошка) по сравнению с подачей порошка спутно с потоком плазмы (когда угол α между направлением подачи и положительным направлением оси потока плазмы меньше 90°), что объясняется большим временем нагрева. Поскольку параметры факела плазмы меняются без скачков, то выбранные для исследований четыре угла подачи (90° ; 120° ; 150° ; 170°) покажут все возможные варианты полета частиц исходного порошка: пролет насквозь через факел плазмы; движение в периферийных областях; движение в приосевой области факела плазмы; а в промежутке между выбранными углами, например при угле 110° , траектории частиц будут промежуточными между траекториями при углах подачи 90° и 120° . Такой широкий диапазон исследований достаточен, чтобы установить закономерности процесса нагрева частиц.

Для подтверждения того, что при изменении угла подачи траектория движения частицы меняется плавно, без скачков, были проанализированы траектории движения частиц при углах подачи 90° ; 120° ; 150° ; 170° , а также при углах подачи 135° и 160° (рис. 3).

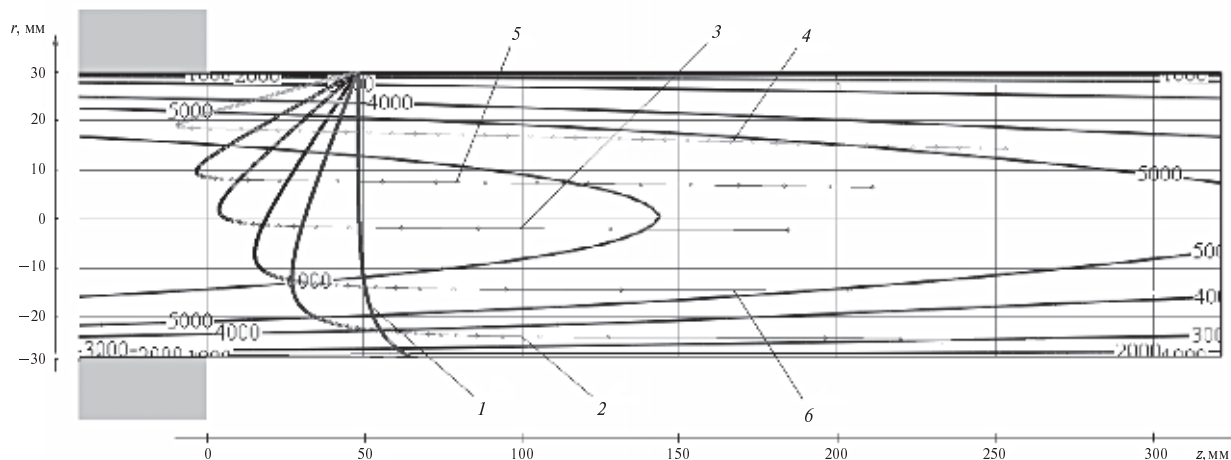


Рис. 3. Траектория движения частиц оксида титана в потоке плазмы в зависимости от угла α подачи порошка: 1 — 90°; 2 — 120°; 3 — 150°; 4 — 170°; 5 — 160°; 6 — 135°

Влияние частиц на параметры и свойства плазменной струи.

Обратное влияние плазмы на частицы

Предлагаемая методика исследования запыленных плазменных струй базируется на теории теплообмена одиночной частицы с плазмой [14].

Взаимодействие между группой частиц и струей плазмы выражается главным образом в передаче энергии от плазмы к частицам. Частицы нагреваются и ускоряются в плазменной струе. Струя же, отдавая энергию, охлаждается и затормаживается. Полагаем, что экранирование одного слоя частиц другим не происходит, так как частицы находятся на некотором расстоянии друг от друга и их пограничные слои не перекрываются. Таким образом, считаем что энергия, затраченная на ускорение и нагревание группы частиц, равна произведению коли-

чества частиц на энергию, переданную плазмой одной частице. Будем считать, что группа частиц появляется в выходном сечении плазматрона мгновенно, размер и начальные скорости частиц одинаковы, т. е. не рассматриваем задачу ввода частиц в плазму (рис. 4). Принимаем допущение, что мелкая частица нагревается равномерно по всему объему, как хорошо теплопроводящее тело, т. е. температура поверхности частицы примерно равна температуре в ее центре.

Расход порошка определяется так:

$$G_n = N_s \rho_s V_s,$$

где G_n — расход порошка, кг; N_s — число частиц; ρ_s — плотность частицы, кг/м³; V_s — объем одной частицы, м³.

Тогда концентрация частиц описывается формулой

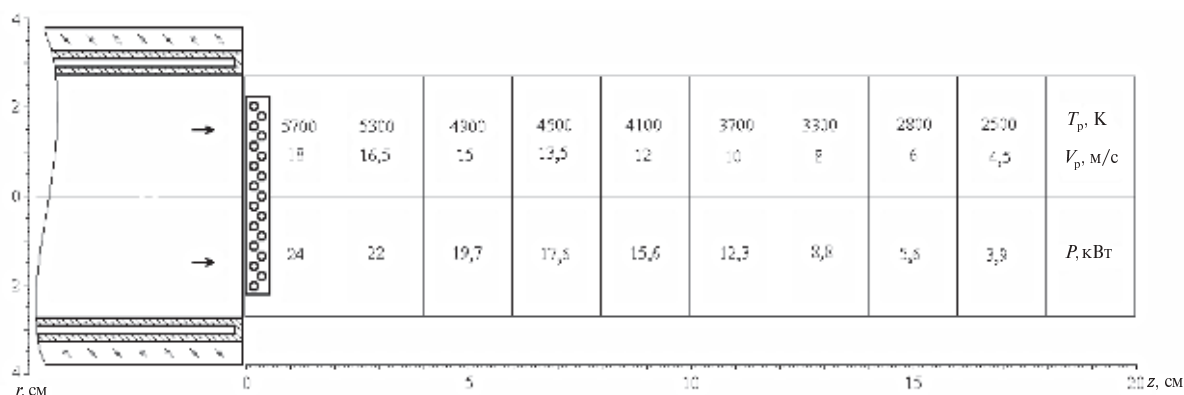


Рис. 4. Модель слоя возникающих частиц



$$n_s = \frac{N_s}{\pi R_c^2 \Delta h},$$

где R_c — радиус сопла плазматрона, м; Δh — ширина возникающего слоя частиц, м

В тех случаях, когда плазменная струя загружена большим количеством твердых частиц, силы вязкостного трения намного меньше количества движения, импульс которого тратится на разгон частиц. Поэтому окончательно при моделировании загруженной струи полагаем, что силы инерции тратятся только на разгон и ускорение группы частиц:

$$\rho v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = C_d \frac{\rho (v_p - v_s)}{2} S_m n_s. \quad (14)$$

Для того чтобы понять, как ускоряется частица, берем формулу для одиночной частицы, при этом траекторная задача не рассматривается:

$$m_s \frac{dv_s}{dt} = C_d \frac{\rho_p (v_p - v_s)^2}{2} S_m. \quad (15)$$

Решая совместно уравнения (14) и (15), находим распределения скорости плазмы и слоя частиц вдоль оси.

При загрузке плазменной струи большим количеством частиц основные потери для плазменной струи связаны с нагреванием этих частиц:

$$q_s = \alpha (T_p - T_s). \quad (16)$$

Коэффициент теплоотдачи α — сложная функция. Он зависит от различных параметров и свойств как самого тела, так и плазмы. Связь между коэффициентом теплоотдачи и указанными параметрами обычно определяется критериальной зависимостью [14]

$$\alpha = \left[2 \frac{v_s \lambda_s}{v_p \lambda_p} + 0,6 \text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{0,33} \right] \frac{\lambda_p}{d_s}.$$

С учетом принятых допущений при больших нагрузках плазменной струи частицами можно предположить, что основная энергия плазменной струи расходуется главным образом на нагревание частиц:

$$\rho v_z c_p \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha (T_p - T_s) S_s n_s. \quad (17)$$

В результате совместного решения уравнений (16) и (17) можно найти распределение температуры плазмы вдоль оси, а также количество тепловой энергии, поглощаемой частицами в каждый момент времени.

Тепловая энергия, поглощаемая частицами, будет расходоваться на их нагрев до температуры плавления, расплавление, нагрев до температуры кипения и испарение расплава. Также часть энергии будет расходоваться на тепловое излучение с поверхности частицы и химическое реакции.

Ниже на рис. 5 и 6 приведены результаты расчетов, выполненные для частицы оксида титана диаметром 15 мкм (расход порошка 5 кг/час), а также предельная весовая загрузка для различных фракций оксида титана.

Для подтверждения правильности математической модели были проведены экспериментальные исследования на вертикальной высокочастотной плазменной установке (частота 5,28 МГц, мощность плазматрона 30 кВт). Результаты теоретических исследований экспериментально полностью подтвердились.

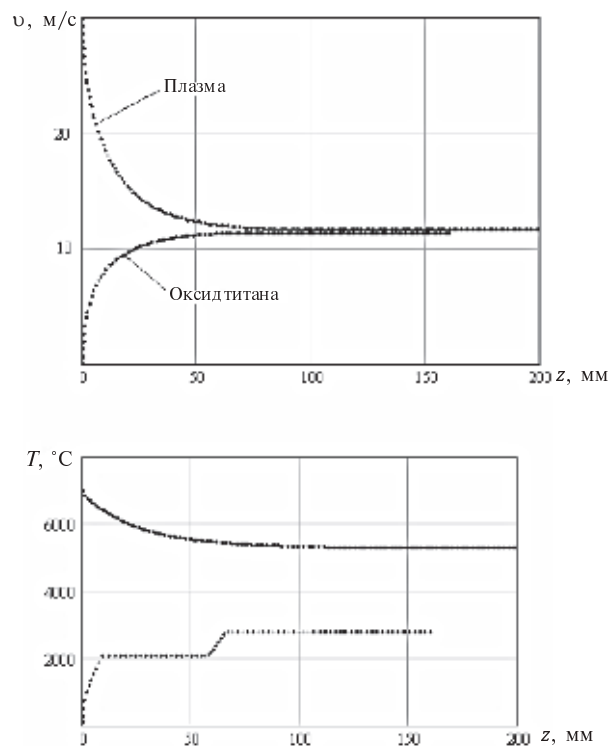


Рис. 5. Результаты расчета струи ВЧИ плазматрона (частота 5,28 МГц и мощность 30 кВт), загруженной частицами оксида титана (расход порошка 5 кг/час)

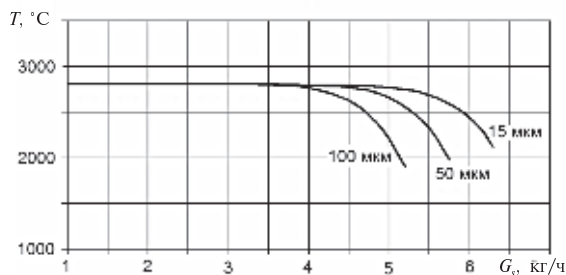


Рис. 6. Предельная весовая нагрузка струи высокочастотного индукционного плазматрона (частота 5,28 МГц и мощность 30 кВт) частицами оксида титана различного диаметра

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Исходные частицы диоксида титана со средним диаметром 15 мкм относятся к классу мелкодисперсных порошков. Они практически безинерционны; если их подавать, уменьшая поток транспортирующего газа, то они мгновенно увлекаются потоком плазмы, оставаясь в холодных ее слоях. Поэтому очень важными параметрами, влияющими на производительность

получения нанодиоксида титана, являются расход транспортирующего газа (должен быть не менее 4 л/мин) и расстояние от торца шихтоввода до оси факела плазмы (должно быть менее радиуса плазматрона).

2. Оптимальный угол подачи при заданных параметрах $\alpha = 150^\circ$, потому что при данном угле частицы проходят через наиболее горячие слои плазмы, где их нагрев происходит более интенсивно. Это позволяет увеличить расход порошка, а следовательно, повысить производительность установки.

3. Установлены размеры реактора, необходимые для полного испарения частиц, с целью получения нанодиоксида титана: длина 200 мм, диаметр 125 мм.

4. Получены предельные весовые загрузки высокочастотного индукционного плазматрона с частотой 5,28 МГц и мощностью 30 кВт частицами оксида титана различного диаметра.

Статья написана при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям в рамках работ по Государственному контракту № 02.513.11.3483 от 08 октября 2009 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pfender, E. Particle Dynamics and Particle Heat and Mass Transfer in Thermal Plasmas. Part I. The Motion of a Single Particle without Thermal Effects [Текст] / E. Pfender, Y.C. Lee // Plasma Chem. Plasma Process.— 1985. Vol. 5. № 3.— P. 211–237.
2. Дресвин, С.В. Физика и техника низкотемпературной плазмы / С.В. Дресвин, А.В. Донской, В.М. Гольдфарб, В.С. Клубникин; под общ. ред. С.В. Дресвина.— М.: Атомиздат, 1972.— 352 с.
3. Boulos, M. Plasma Modeling and Computer Simulation [Текст] / M. Boulos, R. Barnes // Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy / P. W. J. Boumans, ed.— Wiley, New York, 1987.— Part II.— P. 289–352.
4. Асаналиев, М.К. Измерение коэффициента аэродинамического сопротивления шара в аргонной плазме [Текст] / М.К. Асаналиев, Ж.Ж. Жеенбаев [и др.] // ТВТ.— 1988.— Т. 26. № 3. С. 527–534.
5. Dresvin, S.V. Aerodynamic Resistance (Drag Coefficient) of Small Particles Moving in Plasma Flow at Low Reynolds Numbers [Текст] / S.V. Dresvin, S.M. Mikhalkov // Heat and Mass Transfer under Plasma Conditions: Proceedings of International Symposium on Heat and Mass Transfer under Plasma Conditions / Ed. P. Faushais.— Begell House, New York—Wallington (UK), 1995.— P. 199–207.
6. Дресвин, С.В. Поправка для расчета теплообмена плазмы с частицами [Текст] / С.В. Дресвин, С.Г. Зверев // Труды СПбГПУ. Электроэнергетическое оборудование: надежность и безопасность.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006.— С. 175–186.
7. Lee, Y.C. Particle Dynamics and Particle Heat and Mass Transfer in Thermal Plasmas. Part II. Particle Heat and Mass Transfer in Thermal Plasmas [Текст] / Y.C. Lee, Y.P. Chyou, E. Pfender // Plasma Chem. Plasma Process.— 1985. Vol. 5. № 4.— P. 391–414.
8. Сурис, А.Л. Плазмохимические процессы и аппараты [Текст] / А.Л. Сурис.— М.: Химия, 1989.— 304 с.
9. Yoshida, T. Particle Heating in a Radio-Frequency Plasma Torch [Текст] / T. Yoshida, K. Akashi / J. Appl. Phys.— 1977. Vol. 48. № 6.— P. 2252–2260.
10. Ranz, W.E., Marshall W.R. Chem. Eng. Progr., 1952, V.48, № 2.— P. 173.
11. Young, R.M. Nusselt Number Correlations for Heat Transfer to Small Spheres in Thermal Plasma Flows [Текст] / R.M. Young, E. Pfender // Plasma Chem. Plasma Process.— 1987. Vol. 7. № 2.— P. 211–229.
12. Гиршфельдер, Дж. Молекулярная теория газов и жидкостей [Текст] / Дж. Гиршфельдер, Ч. Кертисс, Б. Берд / Перев. с англ.— М.: Изд-во иностр. лит., 1961.— 930 с.



13. **Yoshida, T.** Particle Heating in a Radio-Frequency Plasma Torch [Текст] / T. Yoshida, K. Akashi // J. Appl. Phys.— 1977. Vol. 48. № 6.— P. 2252–2260.

14. **Дресвин, С.В.** Теплообмен в плазме. Учеб. пособие [Текст] / С.В. Дресвин, С.Г. Зверев.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— 212 с.

УДК 537.523.5

*В.Я. Фролов, А.В. Лопота,
Г.К. Петров, Д.В. Иванов*

РАЗРАБОТКА ДУГОВОГО ПЛАЗМОТРОНА ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ИНИЦИИРОВАНИЯ ИНДУКТИВНО СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЫ

Постановка задачи

Для создания комбинированного плазмотрона, предназначенного для получения наноматериалов, необходимо разработать дуговой плазмотрон постоянного тока с заданной длиной плазменной струи. Базовой конструкцией для него является шестисекционный плазмотрон ПН-В1 с диаметром канала 12 мм, показанный на рис. 1 [1]. Он состоит из трех основных блоков: катодного, дугового и анодного, соединенных между собой накидными гайками.

Катодный блок плазмотрона состоит из электродного узла, корпуса и входной секции. Крепление катодного узла в корпусе осуществляется накидной гайкой. Герметизация катодного блока производится специальными резиновыми прокладками. На катодном блоке установлены два штуцера. Штуцер, установленный в корпусе, предназначен для ввода плазмообразующего газа. Штуцер электродного узла — для отвода

охлаждающей воды из плазмотрона и подачи электропитания на катод плазмотрона. Клемма, выполненная на корпусе, служит для подключения высоковольтного провода, необходимого для зажигания дежурной дуги.

Электродный узел включает катододержатель, изолятор, завихритель, катод, катодную гайку. Герметизация электродного узла осуществляется специальными резиновыми прокладками. Основной элемент электродного узла — катод, представляющий собой сменную деталь.

Блок дугового канала состоит из кожуха межэлектродной вставки (МЭВ), накидных гаек, секции МЭВ, шайб и специальных уплотнительных резиновых колец. На кожухе МЭВ имеется также посадочное место под наружное уплотнительное кольцо. Изоляция секций МЭВ друг от друга осуществляется путем установки специальных уплотнительных колец и изоляционных шайб.

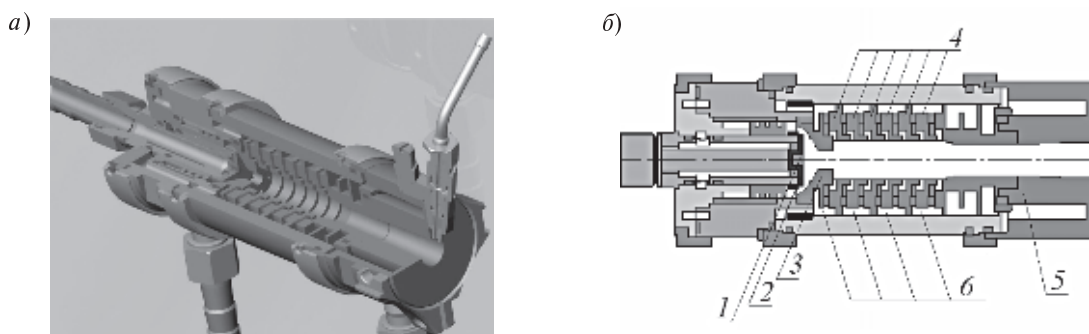


Рис. 1. Вид в разрезе дугового плазмотрона ПН-В1 (а) и его принципиальная схема (б):
1 — гафниевая вставка, 2 — катод, 3 — входная секция, 4 — секции межэлектродной вставки,
5 — анод (сопло), 6 — рубашка охлаждения

Анодный блок конструктивно состоит из анода, анодного корпуса и специального уплотнительного резинового кольца. Штуцер, расположенный на анодном корпусе, предназначен для подключения шланга подачи охлаждающей воды и электропитания на анод плазмотрона.

Разработка дугового плазмотрона

При разработке дугового плазмотрона постоянного тока, предназначенного для иницирования плазмы индуктивно связанного разряда, было принято решение увеличить диаметр канала и сопла плазмотрона до 20 мм. Выбранный диаметр обеспечит низкую скорость истечения плазмы, при которой устойчиво существует ламинарный режим плазменной струи при достаточно высоких расходах плазмообразующего газа.

Исходными данными для разработки плазмотрона с заданной длиной струи плазмы служат конструктивные особенности комбинированного плазмотрона. Общий вид комбинированного плазмотрона и его основные геометрические параметры представлены на рис. 2 (с целью упро-

щения рисунка показано только выходное сопло дугового плазмотрона).

Из рис. 2 следует, что длина генерируемой струи дугового плазмотрона должна находиться в диапазоне 250–350 мм, чтобы обеспечить надежное ионизирование области генерирования индуктивно связанной плазмы (зона индуктора).

Чтобы установить необходимые геометрические размеры и режимы работы дугового плазмотрона, предварительно путем математического моделирования проводился анализ происходящих в нем тепловых, газодинамических и электромагнитных процессов.

В основе используемой математической модели плазменных процессов в дуговом плазмотроне лежат следующие допущения: плазма находится в состоянии локального термодинамического равновесия; плазма ламинарна, она является оптически тонкой. Принятые допущения позволяют рассматривать плазму как сплошную среду.

Дуговые плазмтроны обычно обладают свойством осевой симметрии, поэтому при математическом описании процессов в таких плазмотронах удобно использовать цилиндрическую систему координат, потому что при этом полную картину плазменных процессов можно получить, рассматривая изменение параметров плазмы (температура, скорость и др.) только в двух направлениях: вдоль оси плазмотрона и в направлении его радиуса.

Основные уравнения, входящие в модель плазмы, выражают фундаментальные законы сохранения (энергии, импульса, массы) и для элементарного объема в двумерной цилиндрической системе координат записываются следующим образом [2–4]:

уравнение баланса энергии

$$\rho c_p \left(v_z \frac{\partial T}{\partial z} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \sigma E^2 - u_{rad} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right); \quad (1)$$

уравнения движения для трех составляющих скорости (v_z , v_r , v_ϕ)

$$\rho \left(v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + F_{Bz} + \rho g_z,$$

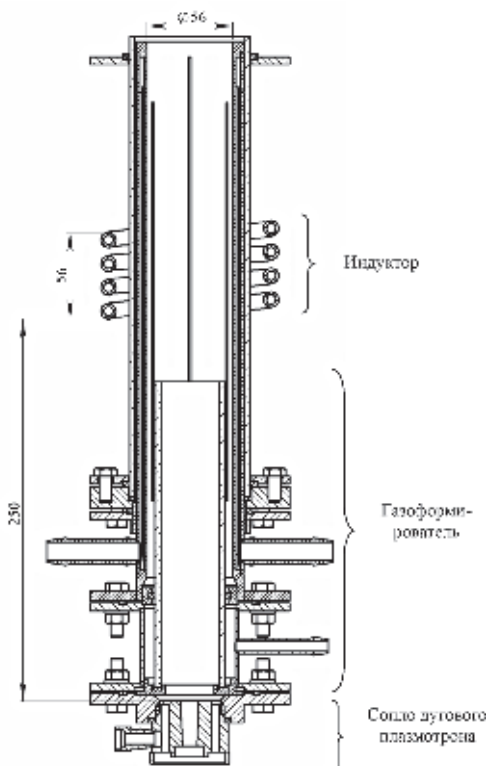


Рис. 2. Вид в разрезе комбинированного плазмотрона



$$\rho \left(v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_\phi^2}{2} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + F_{Br} - \mu \frac{v_r}{r^2}, \quad (2)$$

$$\rho \left(v_z \frac{\partial v_\phi}{\partial z} + v_r \frac{\partial v_\phi}{\partial r} - \frac{v_\phi v_r}{2} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v_\phi}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial v_\phi}{\partial r} \right) + F_{B\phi} - \mu \frac{v_\phi}{r^2};$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r) = 0. \quad (3)$$

В уравнения (1) — (3) входят: параметры плазмы (T — температура; v_z , v_r , v_ϕ — соответственно осевая, радиальная и тангенциальная составляющие скорости; p — давление); теплофизические свойства плазмы (ρ — плотность, c_p — теплоемкость; λ — теплопроводность; μ — вязкость; σ — электропроводность; u_{rad} — удельная мощность излучения); электромагнитные величины (E — напряженность электрического поля; F_{Bz} , F_{Br} , $F_{B\phi}$ — осевая, радиальная и тангенциальная составляющие электромагнитной силы).

Так как плазма в дуговом плазматроне создается электрическим током и существует в электромагнитном поле, то система уравнений (1) — (3) дополняется системой электромагнитных уравнений Максвелла, описывающей электромагнитные процессы, происходящие в плазме:

$$\begin{cases} \text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \text{rot } \vec{H} = \vec{J}, \\ \text{div } \vec{E} = \frac{\rho_{el}}{\varepsilon}, \\ \text{div } \vec{B} = 0. \end{cases}$$

Систему уравнений Максвелла удобно свести к одному уравнению относительно новой, специально вводимой функции — функции i электрического тока [5]:

$$i(r, z) = \int_{\Delta S} J_z dS = 2\pi \int_0^r J_z r dr.$$

Тогда уравнение, описывающее электромагнитные процессы в дуговом плазматроне для напыления, будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{2\pi r \sigma} \frac{\partial i}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{2\pi r \sigma} \frac{\partial i}{\partial r} \right) = 0. \quad (4)$$

Итак, уравнения (1)–(4) представляют собой систему уравнений, которые необходимо решить совместно с целью получения распределений искомых величин — параметров плазмы, а именно: температуры, скорости, давления, электромагнитных величин. В качестве расчетной области берутся канал дугового плазматрона и канал комбинированного плазматрона — область существования дуговой плазмы. На каждой границе расчетной области исходя из простейших физических соображений задаются граничные условия для каждой искомой величины.

Как уже было сказано, в систему (1)–(4), описывающую поведение плазмы, входят ее теплофизические свойства. Для основных газов, которые используются в дуговых плазматронах для напыления, зависимости этих свойств от температуры (обычно при атмосферном давлении) приведены в научных публикациях [6, 7].

Система нелинейных дифференциальных уравнений (1)–(4) решается методом контрольного объема [8, 2–4].

Геометрические размеры разрабатываемого дугового плазматрона представлены на рис. 3. Для получения требуемой длины плазменной струи создавались условия работы плазматрона, обеспечивающие ламинарное течение плазмы. В связи с этим мощность варьировалась в пределах 10–15 кВт, расход газа в пределах 0,4–1 г/с.

Результаты расчета представлены на рис. 4, из которого видно, что требуемые условия обеспечиваются при мощности 10 кВт, расходе газа 0,5 г/с.

Для проверки полученных при моделировании результатов заданный режим подтверждался экспериментальным путем на модели разработанного плазматрона (рис. 5). Видно, что при токе 120 А (что соответствует мощности 10 кВт) и расходе 0,46 г/с длина видимой части плазменной струи составляет 180 мм; это согласуется с результатами расчета.

На рис. 6 представлен вид в разрезе разработанного дугового плазматрона для инициирования плазмы индуктивно связанного разряда,

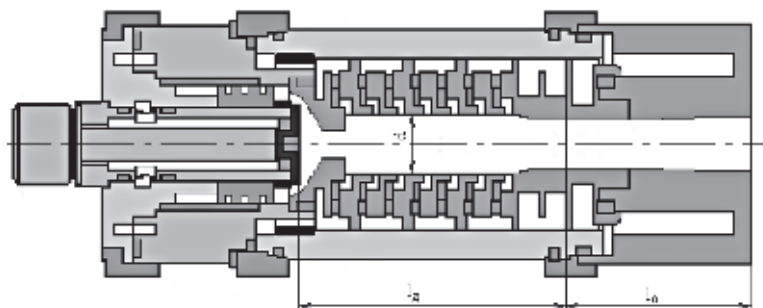


Рис. 3. Геометрия разрабатываемого дугового плазмотрона:
 $d = 20$ мм, $l_d = 60$ мм, $l_a = 48$ мм

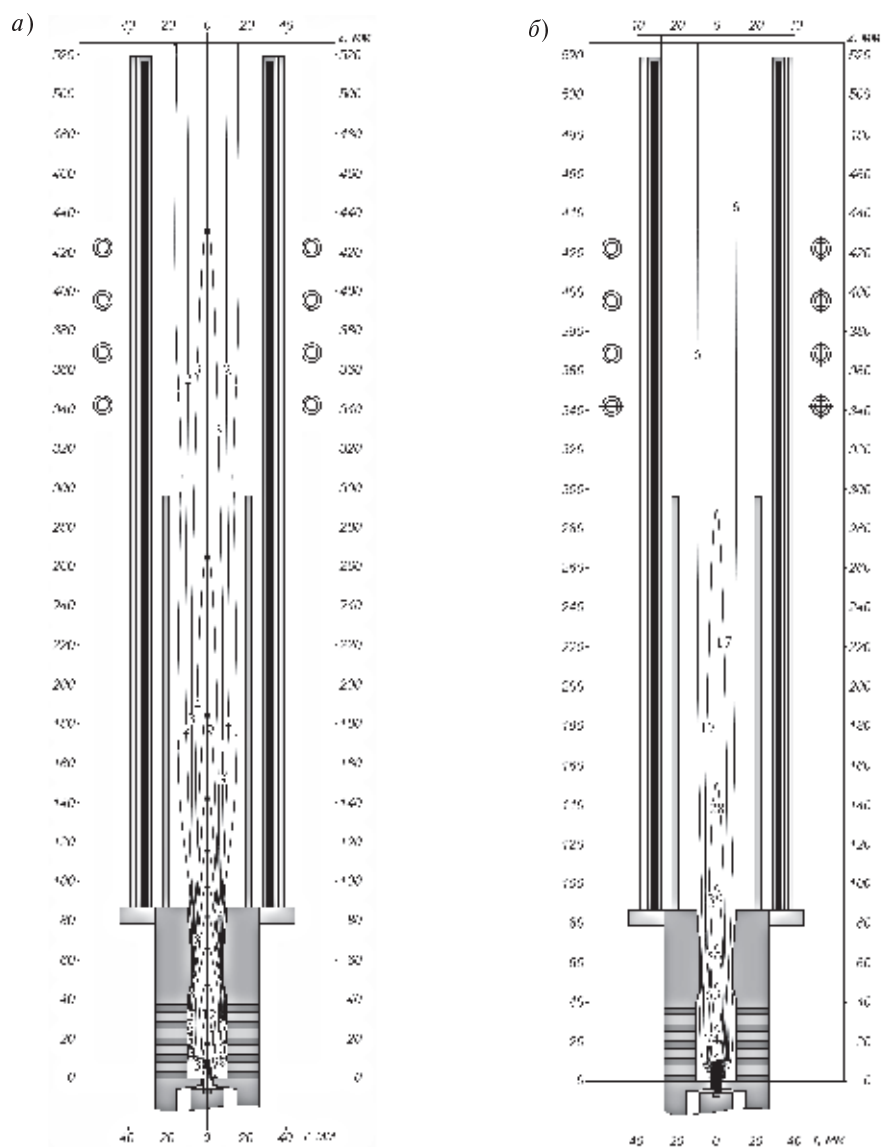


Рис. 4. Распределения температуры в 10^3 К (а) и осевой скорости в м/с (б) плазменной струи дугового плазмотрона постоянного тока при мощности 10 кВт и расходе плазмообразующего газа 0,5 г/с

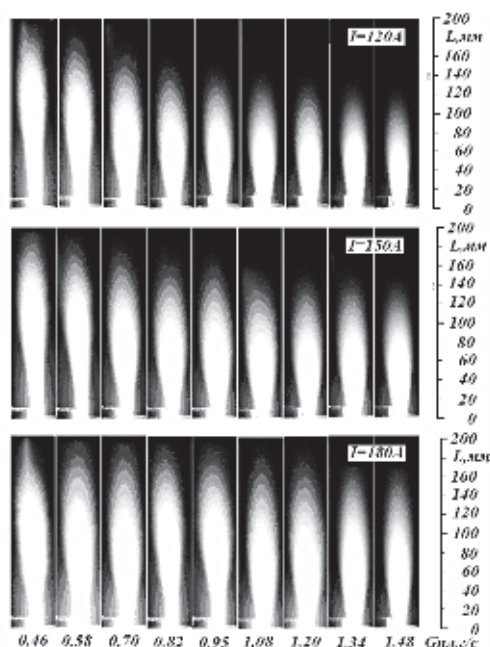


Рис. 5. Зависимость длины плазменной струи плазматрона от расхода плазмообразующего газа (аргона) при различных токах (съемка через нейтральный светофильтр НС-9)

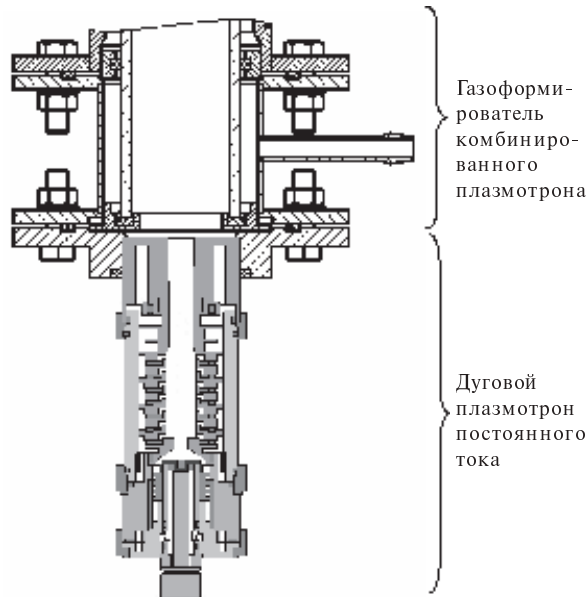


Рис. 6. Дуговой плазматрон постоянного тока для инициирования плазмы индуктивно связанного разряда (вид в разрезе)

подстыкованный к газоформирователю комбинированного плазматрона.

Разработанный плазматрон постоянного тока обеспечивает заданный режим поджига индуктивно связанной плазмы. Что позволило обеспе-

чить поджиг и поддерживать горение индуктивно связанной плазмы мощностью 30 кВт.

Статья написана при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям в рамках работ по Государственному контракту № 02.513.11.3483 от 08 октября 2009 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фролов, В.Я.** Техника и технология нанесения покрытий : учеб. пособие [Текст] / В.Я. Фролов, В.С. Клубник, Г.К. Петров, Б.А. Юшин.— СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— 387 с.
2. **Дресвин, С.В.** Основы математического моделирования плазматронов. Часть 1: Уравнение баланса энергии. Метод контрольного объема. Расчет температуры плазмы: учеб. пособие [Текст] / С.В. Дресвин, Д.В. Иванов.— СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2004.— 227 с.
3. **Дресвин, С.В.** Основы математического моделирования плазматронов. Ч. 2: Электромагнитные задачи в плазматронной технике: Учеб. пособие [Текст] / С.В. Дресвин, Д.В. Иванов.— СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2006.— 296 с.
4. **Дресвин, С.В.** Основы математического моделирования плазматронов. Часть 3: Уравнения движения плазмы. Методика расчета скорости плазмы в плазматронах [Текст]: учеб. пособие / С.В. Дресвин, Нгуен Куок Ши, Д.В. Иванов.— СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2006.— 132 с.
5. **Крылов, А.В.** Исследование стабилизированной и сжатой электрической дуги для сварки и резки металлов [Текст] / А.В. Крылов.— Дисс. — канд. техн. наук: 05.09.10 / СПб гос. техн. ун-т.— СПб., 2000.
6. **Энгельшт, В.С.** Теория столба электрической дуги [Текст] / В.С. Энгельшт, В.Ц. Гурович, Г.А. Десятков [и др.].— Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990.— 376 с. (Низкотемпературная плазма. Т. 1).
7. **Boulos, M.I.** Thermal Plasmas: Fundamentals and Applications: Vol. 1 [Текст] / M.I. Boulos, P. Fauchais, E. Pfender.— New York: Plenum Press, 1994.— 452 p.
8. **Патанкар, С.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости [Текст] / С. Патанкар.— Пер. с англ.— М.: Энергоатомиздат, 1984.— 152 с.

УДК 665.3.004.12:65.012

З.Х.Сикоев, И.В. Асфондиярова

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА И ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

Рынок продовольственных товаров в нашей стране нуждается в новых методах и средствах контроля качества потребляемых населением России товаров, в том числе — в методах и средствах оперативного и дистанционного анализа продовольственных товаров.

Серьезной проблемой является то, что применяемые в России методики и средства измерения качества продуктов питания не обладают необходимыми характеристиками по точности и достоверности, которые позволили бы реализовать современные нормы технического регулирования.

С целью сокращения времени анализа и повышения его информативности во многих отраслях пищевой промышленности сейчас все шире используются информационные технологии и компьютеризованные методы анализа. В лабораториях современных предприятий даже обычные методы объемного анализа (титриметрия) выполняются на компьютеризованных комплексах, включающих поршневые автоматические бюретки, электрометрическое определение конца титрования, автоматический расчет результатов, их регистрацию и отображение на дисплее.

Дифференциация жиров различного происхождения в первую очередь связана с определенным набором жирных кислот, входящих в их состав. Жирнокислотный состав растительных масел устанавливают газохроматографическим методом и последующим сравнением с известным жирнокислотным составом конкретных видов продукции. На сегодня это наиболее достоверный и информативный метод идентификации растительных масел. Однако он требует использования специального и дорогостоящего оборудования. Эти исследования можно проводить при наличии соответствующего оборудования в специализированных лабораториях.

Газохроматографический метод основан на превращении триглицеридов жирных кислот в метиловые (этиловые) эфиры жирных кислот и газохроматографическом анализе последних. Капиллярная газожидкостная хроматография на

типовых капиллярных колонках достоверно регистрирует в жирах до 35 кислот в диапазоне массовых долей жирных кислот 0,1–100 % и пригодна для сертификации, идентификации и выявления фальсификации растительных масел.

Определение жирно-кислотного состава липидов растительных масел проводили методом газожидкостной хроматографии на капиллярной колонке. Для переэтерификации жиров в метиловые эфиры жирных кислот использовали 5 %-ный раствор метилата натрия в абсолютированном метаноле. Анализ проводили на газовом хроматографе фирмы CHROMPACK (модель 9001) (колонка кварцевая 25м×53 мм; неподвижная жидкая фаза — CP-WAX-52CB; детектор — пламенно-ионизационный; температура: колонки — от 110 до 260 °С при скорости подъема 7 градус/минута; испарителя — 270 °С, детектора — 270 °С; газ-носитель — азот (10 мл/мин); объем пробы — 1 мкл)

Концентрации рассчитывают методом внутренней нормализации, принимая поправочные коэффициенты для всех компонентов смеси за единицу. Хроматограммы обрабатывают с использованием прикладных программ, которыми снабжают производители хроматографического оборудования.

В работе был определен жирнокислотный состав новых видов растительных масел, появившихся в последнее время на продовольственном рынке России. Результаты определения жирнокислотного состава различных видов растительных масел приведены в табл. 1.

В еще большей степени компьютеризация необходима при использовании сложных приборов современного спектрального анализа. Например, оценка спектров и расчет результатов, полученных с использованием ИК-Фурье-спектрометров в обязательном порядке производится с использованием компьютерного программного обеспечения.

Нами была рассмотрена и возможность создания соответствующей базы данных раститель-

Таблица 1

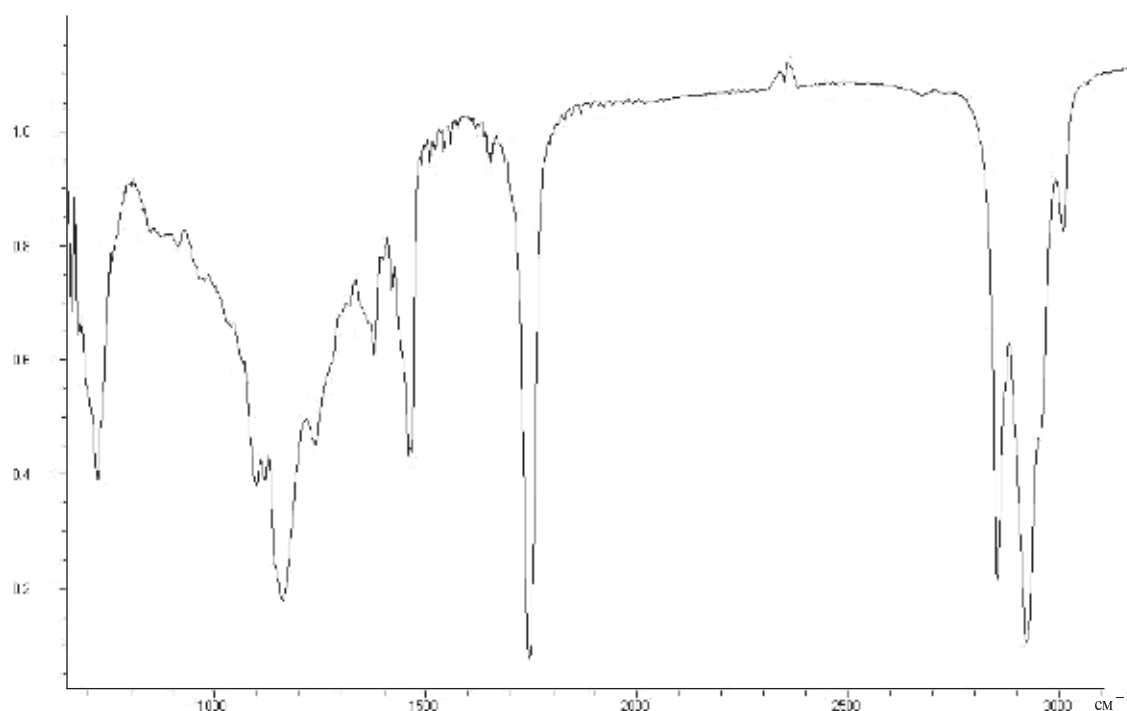
Жирнокислотный состав новых видов растительных масел

Наименование жирной кислоты	Процентная доля жирной кислоты в растительном масле			
	Рисовое	Оливковое «Castelvetere» — Extra Virgin	Тыквенное	Рапсовое
Миристиновая	0,4	—	—	0,1–0,3
Пальмитиновая	19,7	11,9	11,8	4,0
Пальмитолеиновая	0,3	1,3	Следы	0,2–0,5
Стеариновая	2,4	2,9	6,4	1,9–2,3
Олеиновая	43,0	74,3	37,1	44,7–65,5
Линолевая	32,3	8,2	44,0	26,9–17,7
Линоленовая	0,7	0,8	0,2	5,2–8,4
Арахидовая	0,8	0,4	0,5	0,6–0,7
Гондоиновая	0,3	0,3	—	1,3–1,4
Бегеновая	—	—	—	0,9–1,1
Эруковая	—	—	—	0,0–4,9

ных масел, необходимой для определения подлинности и обнаружения фальсификации с помощью ИК-Фурье-спектрометра «ФСМ 1202».

Методы спектрального анализа в сочетании с химическими и физико-химическими методами позволяют решать широкий круг вопросов контроля качества пищевых продуктов, причем

сокращая до минимума время анализа при обеспечении необходимой точности измерений. В частности, они с успехом используются в исследовании липидов. С помощью ИК-спектроскопии проводились исследования липидов в области $700\text{--}4000\text{ см}^{-1}$. Об изменениях можно судить по изменениям в тех частях ИК-спектра, где про-



ИК-спектр валентных колебаний растительного масла

являются колебания, характерные для некоторых функциональных групп ($C=O$, $C=C$ и др.).

ИК-спектр рисового масла

Для липидов характерны: интенсивные полосы в спектре валентных колебаний $C-H$ -групп при $2800-3000\text{ см}^{-1}$; полоса при $1715-1735\text{ см}^{-1}$ (валентные колебания CO -групп); обусловленная валентными колебаниями CO -групп простых эфиров интенсивная полоса при 1170 см^{-1} или интенсивная полоса при 1165 см^{-1} с двумя более слабыми полосами при 1250 и 1110 см^{-1} .

Можно предположить, что полоса поглощения при $1744,8\text{ см}^{-1}$ — очень сильная полоса валентных колебаний $C=O$ -группы в сложных эфирах. Особый интерес для установления структуры моновенасыщенных кислот представляет область $700-1000\text{ см}^{-1}$. В спектрах трансизомеров имеется полоса $966,1\text{ см}^{-1}$, соответствующая $C-H$ -колебанию в изомеризованной группе; частота этого колебания в цисизомере — 700 см^{-1} . Полосы поглощения в области $800-900\text{ см}^{-1}$ связаны с валентными и деформационными колебаниями OH -групп в гидроперекисях. Полоса в области 1100 см^{-1} более интенсивна в пальмовом и кокосовом маслах, ей сопутствует и более интенсивная полоса 1420 см^{-1} . Очевидно, интенсивность этих полос связана с содержанием насыщенных жирных кислот. Полоса 1420 см^{-1} для пальмового масла является постоянной по интенсивности.

Полоса 1400 см^{-1} отсутствует в маслах с малым содержанием ненасыщенных кислот и более интенсивна в маслах, богатых полиненасыщенными кислотами. Очевидно, она связана с наличием в кислотах этиленовых связей, так как исчезает при полимеризации и окислении. Сильный пик при $1466,7\text{ см}^{-1}$ — деформационные колебания $C-H$ в CN_2 , пик слабой интенсивности при 1440 см^{-1} — совместная полоса валентных колебаний $C-O$ и плоскостных деформационных колебаний OH в $COOH$. Необходимо отметить группу слабых полос в области от 1200 до 1400 см^{-1} , что характерно для колебаний в CN_2 карбоновых кислот, число которых дает сведения о длине углеродной цепи. Спектроскопия в ИК-области используется для определения содержания трансизомеров олеиновой кислоты. При воздействии ИК-излучения в области $6,66-12,5\text{ мкм}$ происходит поглощение энергии в результате колебаний скелета или частей моле-

кулы. И поскольку они характерны для всей молекулы в целом, то область $6,66-12,5\text{ мкм}$ часто называют областью «отпечатков пальцев».

Основные методы идентификации и контроля качества базируются на оценке органолептических и физико-химических показателей растительных масел. Электрофизические характеристики пищевых продуктов еще недостаточно широко применяются при анализе и требуют дополнительных исследований. В основе электрофизических методов лежит свойство поляризации и проводимости растворов. По природе взаимодействия внешних и внутренних полей жидкости можно разделить на определенные группы.

К первой группе относятся неполярные, чистые жидкости, в единице объема которых можно пренебречь поляризационными потерями. В этих жидкостях-диэлектриках отсутствует или очень мало влияние полей носителей заряда. Во второй группе — полярных жидкостях (также диэлектриках) — можно пренебречь влиянием носителя заряда, но нельзя не учитывать поляризационные потери. К третьей группе относятся жидкости, в которых присутствуют в весьма малых количествах диссоциированные молекулы раствора и поляризованные с ионами раствора ассоциаты молекул растворителя. В этих жидкостях наблюдается слабое взаимодействие полей носителя заряда с полями диполей и малые поляризационные потери. Для жидкостей четвертой группы (электролиты) характерно сильное взаимодействие полей носителей зарядов «свободных» ионов с полями диполей и между собой.

В соответствии с этим разделением жидкостей на группы исторически сформировались направления исследований и проведение классификации методов измерения на диэлектрические и кондуктометрические методы. Первые служат для определения диэлектрической и весьма слабой проводимости, а также для определения других электрофизических характеристик диэлектриков и полупроводников. Методами кондуктометрии определяют проводимость и другие электрофизические характеристики электролитов.

При опытным определении диэлектрической проницаемости и удельной электропроводности растительных масел различных видов на результат измерений могут оказывать влияние ряд фак-



Таблица 2

Электрофизические показатели растительных масел

Наименование растительного масла	Диэлектрическая проницаемость ϵ при разных температурах и частотах			
	30 кГц	100 кГц	30 кГц	100 кГц
	20 °С		68 °С	
Рисовое	3,188	3,172	3,070	3,00
Оливковое «Castelveter» — Extra Virgin	3,066	3,061	2,961	2,941
Тыквенное	3,161	3,145	3,048	3,027
Рапсовое	3,146	3,130	2,978	2,960

торов: приэлектродные процессы, соотношение токов проводимости и токов смещения в объемной части ячейки датчика, несовершенство охраны полей потенциальных электродов. Существенное значение имеет сохранение однородного электрического поля в рабочем объеме пустой ячейки и при наличии растительного масла, а также степень оптимизации геометрической постоянной ячейки, ее согласование с измерительным прибором [1].

Таким образом, ценность информации о свойстве и структуре измеряемого вещества, полученной с помощью эффекта поляризации и проводимости, повышается, если оптимизировать построение главного звена в цепи измерений, которое характеризует тип взаимодействия прибора и объекта исследования. Это звено — ячейка датчика (датчик).

Опыт работы исследователей электрофизических свойств жидкостей позволяет сформулировать принципиальные требования к образцовой ячейке для определения диэлектрической проницаемости и удельной электрической проводимости различных растворов, в особенности растворов-электролитов [2].

Ячейка должна состоять из двух потенциальных электродов, отделенных друг от друга столбиком — слоем жидкости с такими геометрическими характеристиками (геометрическая постоянная), чтобы все приложенное к электродам внешнее напряжение переменного тока без остатка приходилось на этот столбик жидкости. Поверхности электродов должны обеспечивать при гальваническом контакте с раствором на границе раздела фаз переходное сопротивление, близкое или равное нулю (то есть достаточно большую переходную емкость).

Эти потенциальные электроды целесообразно экранировать третьим охраняемым электродом, не имеющим контакта с раствором и нивелирующим влияние остаточных паразитных параметров. Поверхность электродов желательно иметь бесконечно большой (геометрическая частотная ячейка максимальна в допустимых пределах) [3, 4].

В данной работе были проведены исследования по определению относительной диэлектрической проницаемости ϵ образцов растительных масел. Частота воздействия электромагнитного поля изменялась в пределах от 10 до 100 кГц (шагами через 10 кГц) при двух температурах. Результаты приведены в табл. 2.

Из данных, приведенных в табл. 2, видно, что все исследованные масла имеют свою диэлектрическую проницаемость, если рассматривать ϵ при конкретной частоте и температуре. С увеличением роста частоты электромагнитного воздействия и при повышении температуры наблюдается понижение ϵ .

На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы:

При исследовании жирнокислотного состава растительных масел методом газожидкостной хроматографии с достаточной степенью достоверности можно определить сырьевую принадлежность масел.

Спектроскопию в ИК-области можно использовать для определения содержания транс-изомеров олеиновой кислоты, входящих в состав растительных масел.

Измерение диэлектрической проницаемости можно использовать как один из методов при проведении комплексной идентификации растительных масел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mamishev, A.V. Development and applications of fringing electric field dielectrometry sensors and parameter estimation algorithms [Текст] / A.V. Mamishev, Y. Du, B.C. Lesieutre, M. Zahn Journal of Electrostatics, 1999.— Vol. 46. № 2–3.— P. 109–23.
2. Авт. свид. № 578603. Трехэлектродный датчик / О.А. Белоусов, Б.М. Ефремов, В.М. Леонов [и др.] 1977.— Бюлл. изобр. № 40.
3. Patent № 2209422 RF. Unit for Diagnosis of State of Oil and Products of Its Processing Based on Their Active Electrical Conductivity and Dielectric Permeability [Текст] / 27.07.2003; Byull. 2003.— № 22.
4. Belousov, O.A. Three-Electrode Probe, Inventor's [Текст] / O.A. Belousov, B.M. Efremov Leonov [et. all.] Certificate no.578603, 1977, Бюлл. изобр. № 40.

УДК 537.86

М.А. Марценюк, В.Г.Сивков, М.С.Скляренко

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА В СОВРЕМЕННОМ ПРАКТИКУМЕ

С появлением современного цифрового оборудования, которое берет на себя решение многих вспомогательных задач, взаимодействие с наблюдаемыми физическими явлениями в лаборатории происходит опосредованно, и тем самым студенты как бы отдаляются от изучаемых при этом физических реалий [1, 2]. Поэтому необходимо по-новому организовать практикум, чтобы эффективно использовать новые возможности техники для более углубленного изучения физики. Это вполне удастся при изучении механических движений (например, колебаний физического маятника [3, 4]), а также явления диффузии в растворах окрашенных веществ [5, 6].

Непосредственное наблюдение (чувственное восприятие) этих явлений переходит в их количественное выражение с помощью цифровой фотосъемки и последующей компьютерной обработки полученных экспериментальных результатов. В итоге достигается не только качественное, но и высокоточное количественное выявление физических закономерностей.

Значительно труднее достигнуть чувственного восприятия при изучении электромагнитных явлений, которые большей частью недоступны непосредственному наблюдению. Цель нашей работы состояла в преодолении подобных трудностей при изучении явлений в электрических цепях. Для визуализации токов, текущих в электрической цепи, предлагается использовать лампу накаливания. По изменению яркости свечения лампы мы можем качественно судить о росте

или убывании электрического тока в цепи. Составляя простые цепи, содержащие подобранные по номиналам емкость C и резистор R (цепочка RC), индуктивность L и резистор R (цепочка RL) таким образом, чтобы их постоянные времени были больше долей секунды, мы можем судить об особенностях протекания тока в этих цепях по свечению лампы. Эти наблюдения позволяют сделать качественные выводы о релаксационном характере токов, о зависимости токов от величин индуктивности, емкости и сопротивления, установить различие в поведении емкости и индуктивности, а также построить наглядные математические и механические модели, которые могут быть использованы и для тех временных масштабов, когда непосредственное наблюдение невозможно.

После этого осуществляется переход к количественному анализу явлений. Прежде всего, с помощью скоростной цифровой фотосъемки выясняется, в какой степени лампа накаливания может использоваться как индикатор тока; находится ее характеристика в осях «яркость — напряжение», которая аппроксимируется полиномом; устанавливается область времен (частот), в которой яркость свечения лампы адекватно отражает изменение тока. Далее анализируется поведение цепочек RC и RL при включении и выключении источника постоянного напряжения.

Наблюдения ведутся двумя способами: по изменению яркости свечения лампы накаливания (скоростная фотосъемка) и по показаниям цифрового осциллографа. Цифровые данные



обрабатываются в численных расчетах и устанавливается полное количественное совпадение результатов тех и других наблюдений.

Полученные данные и модели, развитые на их основе, используются для интерпретации токов в цепочках RC и RL для таких номиналов элементов этих цепей, при которых непосредственное наблюдение с помощью лампы накаливания становится невозможным, но тем не менее характер явлений сохраняется, что можно видеть только по наблюдениям с помощью цифрового вольтметра и осциллографа.

Описанные выше эксперименты и модели позволяют перейти к более сложной задаче — исследованию электрического колебательного контура (цепочка RCL). Здесь анализируется и интерпретируется наблюдаемый экспериментально колебательный характер токов и напряжений, в том числе характер вынужденных колебаний, устанавливается зависимость собственной частоты колебаний от параметров контура.

Цепочки с индуктивностью и емкостью. Как уже отмечено, для более глубокого понимания физики работы катушки индуктивности и конденсатора процессы, происходящие в RL и RC цепях, визуализируются с помощью лампы накаливания, которая используется в качестве индикатора тока. На рис. 1, *a* представлена зависимость силы тока I от напряжения U на лампе накаливания, т. е. вольт-амперная характеристика (ВАХ). На начальном участке зависимость имеет нелинейный участок, что связано с резким изменением сопротивления лампы при ее нагревании (напряжение зажигания составляет 0,7 В). На данном участке лампа будет вести себя как нелинейный резистивный элемент, что существенно искажает характерный временной ход

кривых при переходных процессах. Для обеспечения количественного измерения напряжения U на лампе накаливания по ее яркости Br используется скоростная цифровая фотокамера Basler WatchGuard A504кс, позволяющая осуществлять съемку с частотой до 500 кадров/с. Предварительно строится калибровочная зависимость яркости лампы, определяемой по ее цифровому изображению, от напряжения. При этом под яркостью Br понимается среднее значение интенсивности цветных компонент в пространстве RGB. Поскольку нам необходимо при измерениях решать обратную задачу — определять напряжение по яркости, то удобнее построить калибровочную зависимость, отложив по оси абсцисс яркость, по оси ординат — напряжение. Полученная зависимость хорошо аппроксимируется полиномом

$$U = (9,54 \cdot 10^{-7} Br^3 - 2,29 \cdot 10^{-4} Br^2 + 0,027 Br + 1), \text{ В.}$$

Для исследования переходных процессов использовались схемы (рис. 2), позволяющие проследить по изменению яркости лампы накаливания изменение тока в цепях RL и RC при включении и выключении источника постоянного напряжения. К лампе параллельно подключался цифровой осциллограф Lecroy WaveSurfer, регистрирующий в режиме самописца напряжение на лампе, которое на линейном участке ВАХ пропорционально току в цепи.

В RL цепи ВАХ лампы накаливания смещают по току с помощью источника постоянного напряжения таким образом, чтобы при положении переключателя Π в позиции 2 напряжение на лампе составляло 1 В; таким образом, лампа работает на линейном участке ВАХ (см. рис. 1, *a*). В цепочке с конденсатором создать смещение по току не удастся, однако в данной цепи нели-

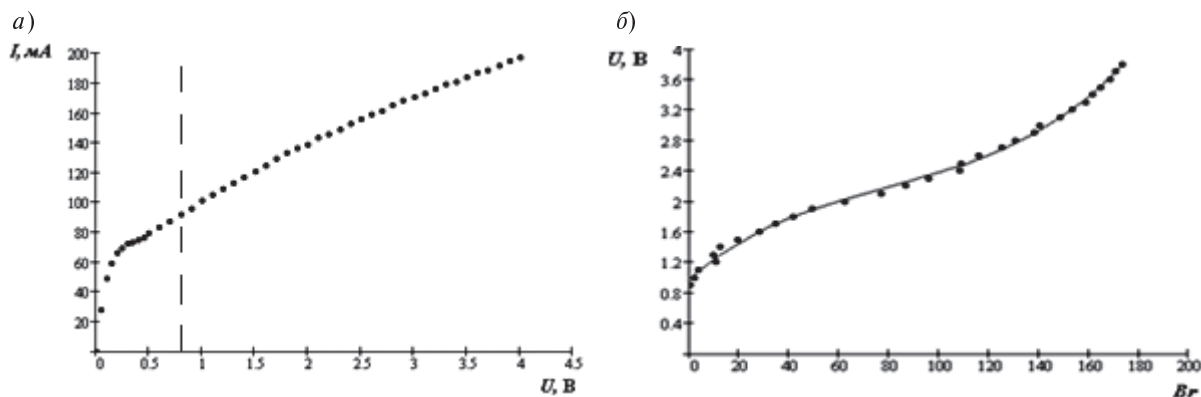


Рис. 1. Характеристики лампы накаливания: *a* — ВАХ, *б* — зависимость напряжения от яркости (точки — эксперимент, сплошная линия — результат аппроксимации полиномом)

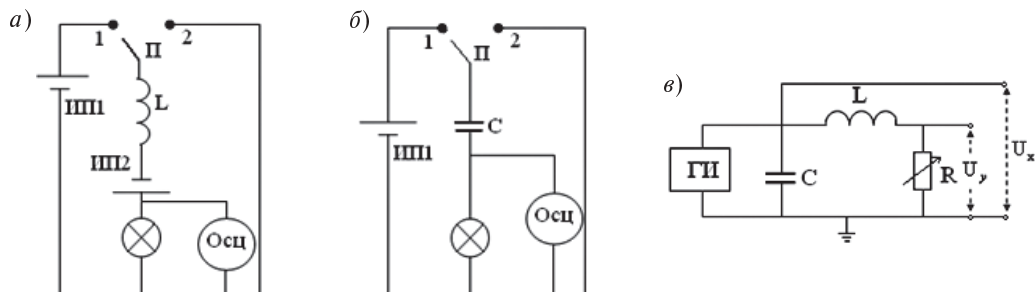


Рис. 2. Принципиальные схемы установок для исследования переходных процессов в RL (а) и RC (б) цепях и электрических колебаний (в)

нейность ВАХ не будет играть заметной роли. Процессы зарядки и разрядки конденсатора характеризуется резким скачком тока и его последующей релаксацией. Таким образом, лампа будет быстро нагреваться, но ввиду тепловой инерции не успеет остыть при релаксации тока и не внесет существенных искажений, связанных с нелинейностью ВАХ.

На рис. 3 показаны зависимости напряжений на лампе при включении переключателя П в положение 1, затем последовательно после паузы в несколько секунд — переключение в положение 2. Зависимости были получены как путем анализа данных цифровой фотосъемки, так и с помощью цифрового осциллографа. Напряжения показаны в относительных единицах (напряжение на лампе без учета постоянного смещения, деленное на максимальное значение напряжения на лампе). Проводились по две серии экспериментов (на рис. 3 обозначены цифрами 1,2) соответствующие различным значениям индуктивности и емкости: $L_1 = 10,9$ Гн, $L_2 = 4,25$ Гн, $C_1 = 82000$ мкФ, $C_2 = 129000$ мкФ. Как видим, увеличение индуктивности и емкости приводит

к увеличению времени релаксации (напряжение спадает и нарастает медленнее).

Как видим, результаты обоих способов измерений с высокой степенью точности совпадают между собой. Различие кривых для цепи RC обусловлено отсутствием смещения ВАХ лампы (при напряжении меньше 0,7 В лампа не горит) и отсутствием отрицательных яркостей.

При нахождении переключателя П в положении 1 в цепи RL (см. рис. 2, а) справедливо следующее соотношение:

$$U_1 + U_2 + U_L = U + \tilde{U}, \quad (1)$$

где U_L — ЭДС самоиндукции; U_1, U_2 — ЭДС источников питания ИП1, ИП2; U — напряжение на лампе; \tilde{U} — напряжение на эквивалентном последовательном омическом сопротивлении проводов катушки индуктивности R_L . ЭДС самоиндукции равна

$$U_L = -L \frac{dI}{dt}, \quad (2)$$

где I — ток в цепи. Ток можно выразить через значение напряжения на лампе и ее сопротивление R :

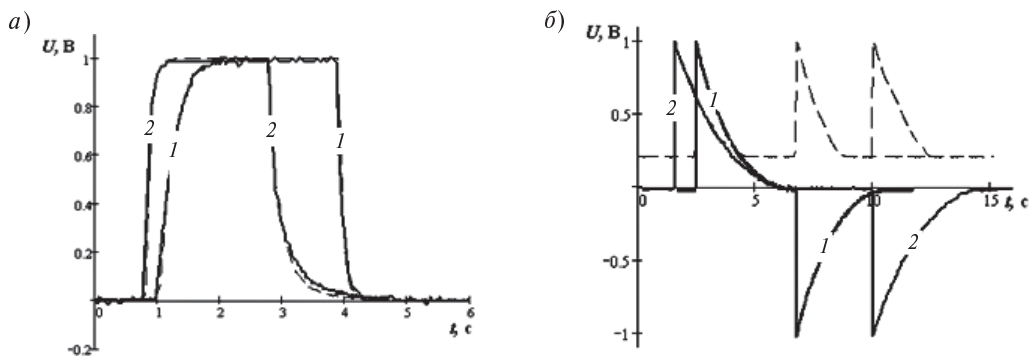


Рис. 3. Переходные процессы в RL (а) и RC (б) цепях:

сплошная линия — данные осциллографа, пунктир — результат обработки данных цифровой фотосъемки



$$I = \frac{U}{R}. \quad (3)$$

Тогда

$$\tilde{U} = IR_L = U \frac{R_L}{R}. \quad (4)$$

Из (3) и (2) получаем $U_L = -\frac{L}{R} \frac{dU}{dt}$. Подставив получившееся выражение в (1), с учетом (4) получаем дифференциальное уравнение для напряжения на лампе

$$\frac{L}{R} \frac{dU}{dt} + U + U \frac{R_L}{R} = U_1 + U_2. \quad (5)$$

В начальный момент времени, когда переключатель находится в положении 2 и на лампе падает напряжение смещения $U_2 \frac{R}{R+R_L}$, с учетом данного начального условия получаем следующее решение уравнения (5):

$$U = U_1 \frac{R}{R+R_L} (1 - \exp(-t/\tau)) + U_2 \frac{R}{R+R_L}, \quad (6)$$

где введена постоянная времени $\tau = \frac{L}{R+R_L}$.

При обратном переключении из положения 1 в положение 2 напряжение на лампе будет меняться следующим образом:

$$U = U_1 \frac{R}{R+R_L} \exp(-t/\tau) + U_2 \frac{R}{R+R_L}. \quad (7)$$

Для RC цепи при положении переключателя П в позиции 1 (см. рис. 2, б) справедливо

$$U_1 = U_C + U, \quad (8)$$

где $U_C = \frac{q}{C}$ — напряжение на конденсаторе; q — заряд; C — емкость конденсатора. Продифференцировав (8) по времени, получаем

$$0 = \frac{dq}{dt} \frac{1}{C} + \frac{dU}{dt} = \frac{I}{C} + \frac{dU}{dt}. \quad (9)$$

Подставляя (3) в (6), получаем

$$\frac{U}{RC} + \frac{dU}{dt} = 0. \quad (10)$$

Соответственно в процессе заряда конденсатора (переключатель П в положении 1) будет напряжение

$$U = U_1 \exp(-t/\tau), \quad (11)$$

а в процессе разряда (переключатель П в положении 2)

$$U = -U_1 \exp(-t/\tau), \quad (12)$$

где постоянная времени равна $\tau = RC$.

С помощью аппроксимации кривых переходных процессов (см. рис. 3) известными теоретическими зависимостями можно найти постоянные времени цепей. Постоянные времени составили $\tau_1 = 0,22$ с, $\tau_2 = 0,08$ с для RL цепи и $\tau_1 = 1,19$ с, $\tau_2 = 1,91$ с для RC цепи.

Колебательный контур. Для исследования использовался последовательный колебательный контур, на конденсатор которого с генератора (ГИ) подавались прямоугольные импульсы (см. рис. 2, в). При этом период следования импульсов был много больше периода собственных колебаний системы. На X -вход осциллографа подавался сигнал с конденсатора C , на Y -вход осциллографа — с резистора R .

Для заряда q на обкладках в цепи контура справедливо уравнение

$$\ddot{q} + 2\delta\dot{q} + \omega_0^2 q = 0, \quad (13)$$

где $\delta = \frac{R+R_L}{2L}$ — декремент; $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ — частота свободных колебаний при отсутствии сопротивления.

Пусть $R_0 = R + R_L$ — общее омическое сопротивление цепи (с учетом сопротивления проводов катушки индуктивности). При общем сопротивлении, меньшем критического сопротивления

$R_{кр} = \sqrt{\frac{L}{C}}$ [2], в контуре возникнут затухающие колебания:

$$q = CU_{ГИ} e^{-\delta t} \cos(\omega t), \quad (14)$$

где $U_{ГИ}$ — амплитуда импульсов с генератора

ГИ; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$. При сопротивлении, равном критическому, в системе будет наблюдаться апериодическое затухание

$$q = CU_{ГИ} (1 + \delta t) e^{-\delta t}; \quad (15)$$

при сопротивлении большем критического заряд будет меняться по следующему закону:

$$q = CU_{ГИ} \left(\frac{\gamma_2 e^{-\gamma_1 t} + \gamma_1 e^{-\gamma_2 t}}{\gamma_1 + \gamma_2} \right), \quad (16)$$

где $\gamma_{1,2} = \delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$.

Напряжение на конденсаторе равно $U_x = \frac{q}{C}$,

напряжение на сопротивлении — $U_y = R\dot{q} = RC\dot{U}_x$; таким образом, с помощью записи сигналов на осциллографе можно получить фазовую траекторию процесса.

Была проведена серия экспериментов при различных значениях сопротивления резистора ($R_1 = 100 \text{ Ом}$, $R_2 = 400 \text{ Ом}$, $R_3 = 900 \text{ Ом}$, $R_4 = 2000 \text{ Ом}$) и неизменных $L = 218 \text{ Гн}$, $C = 55 \text{ нФ}$, $R_L = 64,4 \text{ Ом}$. На рис. 4 показаны зависимости напряжения на конденсаторе от времени и фазовые траектории процессов (кривые различных процессов помечены цифрами 1–4 в зависимости от значения сопротивления резистора). Напряжения показаны в относительных единицах:

$$\tilde{U}_x = \frac{U_x}{\max(|U_x|)}, \quad \tilde{U}_y = \frac{U_y}{\max(|U_y|)}.$$

Если вместо резистора R (см. рис. 2, в) включить источник переменного напряжения с частотой γ и амплитудой U_m , то колебания в системе будут описываться уравнением

$$\ddot{q} + 2\delta\dot{q} + \omega_0^2 q = \frac{U_m \cos(\gamma t)}{L}. \quad (17)$$

Установившиеся вынужденные колебания будут соответствовать закону [2]

$$q = q_m \cos(\gamma t + \varphi), \quad (18)$$

где амплитуда и фаза зависят от частоты внешнего напряжения:

$$q_m = \frac{U_m / L}{\sqrt{(\omega_0^2 - \gamma^2)^2 + 4\delta^2\gamma^2}}, \quad (19)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{2\delta\gamma}{\omega_0^2 - \gamma^2}\right). \quad (20)$$

Зависимость амплитуды напряжения на конденсаторе от частоты (амплитудно-частотная характеристика):

$$U_C = \omega_0^2 \frac{U_m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \gamma^2)^2 + 4\delta^2\gamma^2}}. \quad (21)$$

При совпадении частоты γ с частотой свободных незатухающих колебаний ω_0 в контуре

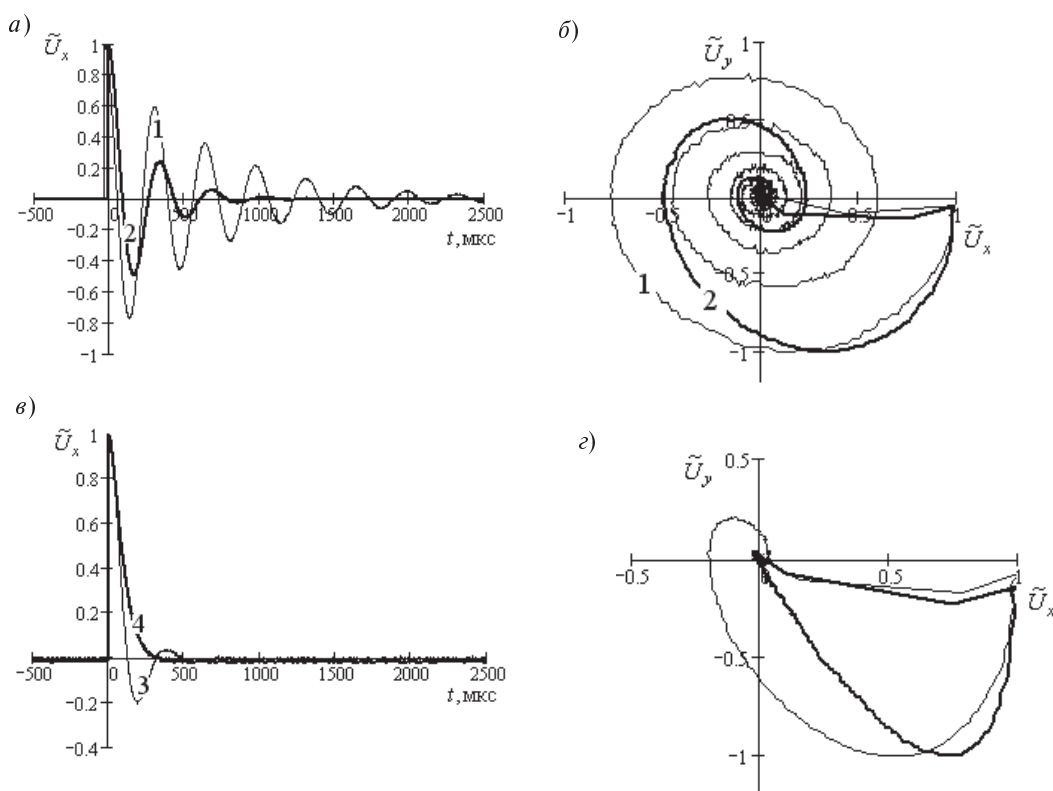


Рис. 4. Зависимости напряжения на конденсаторе (а, в) и фазовые траектории (б, з)



амплитуда напряжения на конденсаторе резко возрастает (резонанс напряжений) [2]. При этом резонансное значение амплитуды равно

$$U_{\text{рез}} = \frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{L}{C}} U_m. \quad (22)$$

На рис. 5. показана зависимость квадрата амплитуды напряжения на конденсаторе от частоты внешнего напряжения (в относительных единицах, $\tilde{U}_c^2 = (U_c/U_{\text{рез}})^2$). С помощью аппроксимации данной кривой теоретической зависимостью (21) были определены следующие параметры колебательного контура; $\delta = 590,42 \text{ с}^{-1}$, $\omega_0 = 9,24 \times 10^3 \text{ рад/с}$; при этом расчетные значения данных

параметров составляют: $\delta = 2 \frac{R_L}{L} = 2 \frac{64,4 \text{ Ом}}{218 \text{ мГн}} =$

$$= 590,83 \text{ с}^{-1}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} = \sqrt{\frac{1}{218 \text{ мГн} \cdot 55 \text{ нФ}}} =$$

$= 9,13 \cdot 10^3 \text{ рад/с}$. Как видим, результаты аппроксимации с большой степенью точности совпадают с экспериментальными данными и расчетными значениями параметров.

Механические модели протекания тока в цепочках с индуктивностью и емкостью и в колебательном контуре. Полученные результаты полезно интерпретировать с помощью наглядных механических моделей, опираясь на которые, студент сможет достичь более глубокого понимания наблюдаемых явлений. Процесс зарядки электрического конденсатора может быть представлен в виде процесса перекачки жидкости из сосуда *A* в сосуд *B* с помощью насоса *P* (рис. 6, *a*). Для простоты предполагаем, что площадь поперечного сечения S_A сосуда *A* много больше, чем

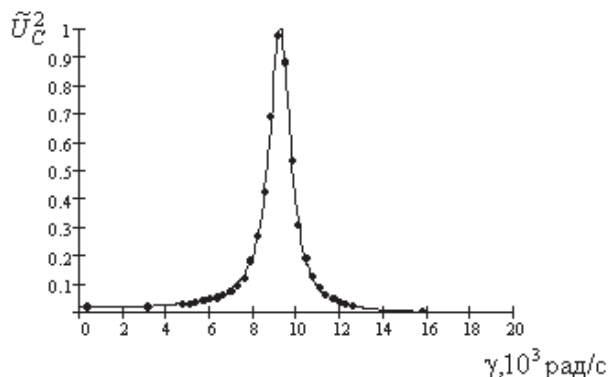


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика при $R = 0$ (точки — эксперимент, сплошная линия — теоретическая зависимость)

сечение S_B сосуда *B*: $S_A \gg S_B$. Это позволяет в дальнейшем считать уровень жидкости в сосуде *A* постоянным.

Насос *P* питается от внешнего источника энергии E , а h — это максимальная высота, на которую данный насос может поднять жидкость; поэтому объем жидкости, который можно закачать в сосуд *B*, ограничен и определяется площадью его сечения S . Когда в сосуд *B* закачено максимальное для данного насоса количество жидкости $m = \rho Sh$ (здесь m — масса жидкости, ρ — плотность), энергия столба жидкости в сосуде равна $E_B = \frac{1}{2} mgh$. Она получена умножением

силы тяжести mg на высоту центра $\frac{1}{2} h$ столба жидкости. Учитывая, что $m = \rho Sh$, представим

эту энергию в виде $E_B = \frac{1}{2} \rho g Sh^2 = \frac{1}{2} C_B h^2$; здесь

введена энергетическая «емкость» столба $C_B = \rho g S$. Сравнивая полученное выражение для энергии E_B с энергией заряженного конденса-

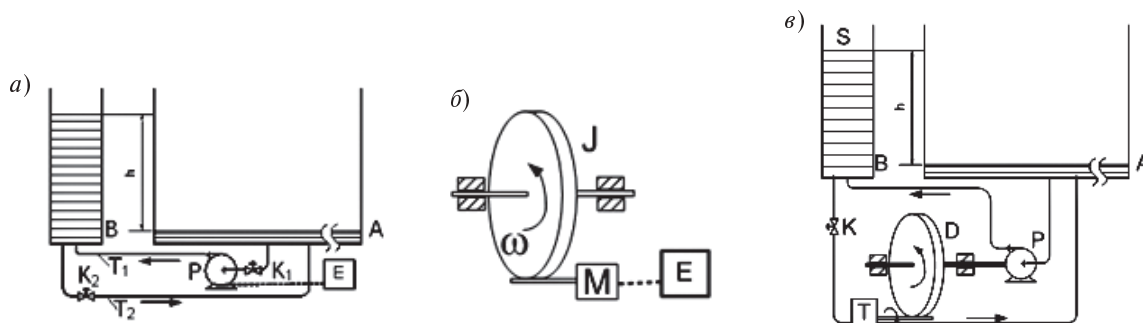


Рис. 6. Механические модели электроемкости (*a*), индуктивности (*б*) и колебательного контура (*в*)

тора $E_B = \frac{1}{2}CU^2$, мы видим, что величина C_B соответствует электрической емкости конденсатора C , а высота столба жидкости h — напряжению на обкладках конденсатора U .

Стоит отметить, что, как и электрическая емкость, введенная выше «емкость» столба жидкости зависит от его геометрических параметров. Роль «заряда» в механической модели будет играть сила тяжести mg , действующая на столб жидкости, а связь $mg = \rho gSH = C_B h$ эквивалентна аналогичному соотношению для конденсатора $q = CU$, где величина q — заряд на его обкладках (см. табл.).

Для того чтобы эта модель могла описывать поведение электроемкости при зарядке и разрядке, необходимо также предположить, что движение жидкости безинерционно. Например, это может быть следствием того, что велика вязкость жидкости, а трубы Т1 и Т2 имеют достаточно малое сечение. Можно также предположить, что жидкость имеет малую плотность ρ или заполнена пористой средой.

Как известно, индуктивность L проявляет свойства, аналогичные инерции. Поэтому в качестве механической модели индуктивности примем массивный диск, заключенный в кожух с откачанным воздухом (на рис. 6, б не показан). Для раскручивания диска используется мотор M , который питается от внешнего источника E .

Кинетическая энергия диска E_D равна половине произведения его момента инерции J на квадрат угловой скорости вращения ω :

$$E_D = \frac{1}{2}J\omega^2; \text{ это аналогично энергии } E_L \text{ индуктивной катушки } L, \text{ по которой протекает ток } I:$$

$$E_L = \frac{LI^2}{2}.$$

Соединяя модели емкости и индуктивности, получаем механическую модель электрического колебательного контура (рис. 1, в). Предположим, что в сосуд B предварительно накачана жидкость до уровня h . Если открыть кран K , то безинерционная жидкость потечет через турбину T и раскрутит диск D , который в свою очередь будет вращать насос P , а насос будет возвращать некоторую часть жидкости из сосуда A в сосуд B . Первоначально вращение диска D будет медленным и баланс жидкости будет отрицательным, то есть утечка будет превышать приток, так что в некоторый момент времени сосуд B станет пустым. Однако раскрученный потоком жидкости диск будет продолжать вращаться по инерции и в результате насос вновь сможет наполнить сосуд B . Если пренебречь потерями энергии на трение, то мы получим колеблющуюся механическую систему, принцип действия которой во многом аналогичен работе электрического ко-

Сопоставление параметров электрической емкости и ее механической модели

Сопоставляемые величины			
Электрическая емкость		Жидкость в сосуде В	
Энергия заряженного конденсатора	$E_C = \frac{1}{2}CU^2$	Энергия столба жидкости в поле тяжести	$E_B = \frac{1}{2}C_B h^2$
Связь между зарядом на обкладках и напряжением	$q = CU$	Связь между аналогом заряда mg и аналогом напряжения h	$mg = C_B h$
Емкость плоского конденсатора	$C = \frac{\epsilon S}{4\pi d}$	Аналог емкости	$C_B = \rho g S$
Катушка индуктивности		Вращающийся диск	
Энергия катушки, по которой протекает электрический ток L	$E_L = \frac{1}{2}LI^2$	Энергия вращающегося диска D	$E_D = \frac{1}{2}J\omega^2$
Индуктивность катушки	L	Аналог индуктивности — момент инерции диска	J
Электрический ток в катушке	I	Угловая скорость вращения диска	ω
ЭДС самоиндукции	$U = L \frac{dI}{dt}$	Момент силы инерции	$K = J \frac{d\omega}{dt}$



лебательного контура. Сравнение колебательно-го контура с математическим маятником, обычно используемое в литературе (см., например, [7, с. 70]), нам представляется менее удачным.

Обучение методам физического наблюдения (методам экспериментальной физики) всегда представляло собой сложную задачу. В настоящее время ее решение усложняется тем, что физическая реальность ускользает, заслоняясь виртуальным компьютерным миром.

Весьма показателен итог тестирования американских школьников на знание ими законов Ньютона. Оказалось, что 80 % из них не знают первого закона Ньютона, т. е. живут доньютоновскими представлениями [8, 9]. В качестве средства для преодоления этого недостатка про-

фессором Гестенесом [8, 9] был предложен «модельный метод». Он заключается в следующем: в школьном курсе механики выделено шесть главных моделей, которые охватывают все его содержание; указанные модели изучаются путем анализа специально организованных опытных наблюдений и затем на их основе строится все остальное содержание курса.

Наш многолетний опыт преподавания показывает, что в курсе электричества столь же «непереваренными», как и первый закон Ньютона в механике, остаются понятие самоиндукции и работа колебательного контура. В будущем эта тема должна составить одну из базовых моделей курса электричества. Этим вызвано то пристальное внимание, которое мы уделили ей в нашей статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Портис, А.** Физическая лаборатория [Текст]: пер. с англ. / А. Портис. — М.: Наука, ГРФМЛ, 1972. — 320 с.
2. **Сивков, В.Г.** Физический практикум по электричеству и магнетизму [Текст] / В.Г. Сивков, Г.И. Субботин. — Изд. 2-е. — Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 2004. — 232 с.
3. **Склярченко, М.С.** Экспериментальное исследование механических колебаний методом скоростной фотосъемки [Текст] / М.С. Склярченко, М.А. Марценюк // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2007. — № 4. Т. 1. — С. 167–174.
4. **Склярченко, М.С.** Исследование вынужденных механических колебаний методом скоростной фотосъемки [Текст] / М.С. Склярченко, М.А. Марценюк, В.Г. Сивков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2009. № 90. — С. 244–252.
5. **Марценюк, М.А.** Компьютерные методы в учебном исследовании процесса диффузии [Текст] /
- М.А. Марценюк, М.С. Склярченко // Компьютерное моделирование 2007. Тр. междунар. науч.-техн. конф. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. — С. 153–154.
6. **Склярченко, М.С.** Методы компьютерного видения в физическом эксперименте [Текст] / М.С. Склярченко // Вестн. Перм. ун-та. — 2007. — Вып. 10(15). Информационные системы и технологии. — С. 85–93.
7. **Фейнман, Р.** Фейнмановские лекции по физике. Т. 6: Электродинамика [Текст] / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. Пер. с англ. Изд. 2-е. — М.: Мир, 1977. — 350 с.
8. **Hestenes, D.** Oersted Medal Lecture 2002: Reforming the mathematical language of physics [Электронный ресурс], Am. J. Phys. 2003. — 71 (2), 104, <http://modeling.la.asu.edu/>
9. **Wells, M.** A modeling method for high school physics instructions [Электронный ресурс] / M. Wells, D. Hestenes, G. Swackhammer. — Am. J. Phys. — 1995. — 63 (7), 606, <http://modeling.la.asu.edu/>

УДК 620.178.746.4; 669.001.5

Н.Г. Колбасников, О.Г. Зотов, А.А. Лукьянов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ СТАЛЕЙ ПАДАЮЩИМ ГРУЗОМ И ДОЛИ ВЯЗКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ИЗЛОМЕ

Постановка задачи. В настоящее время к промышленным сталям предъявляют высокие требования по ударным характеристикам. Одно из таких требований для трубных сталей, особенно используемых в условиях Крайнего Севера, для

прокладки подводных трубопроводов или работающих в условиях сейсмической или террористической опасности, — это высокая вязкость разрушения, определяемая при испытаниях падающим грузом (ИПГ). Испытывают обычно

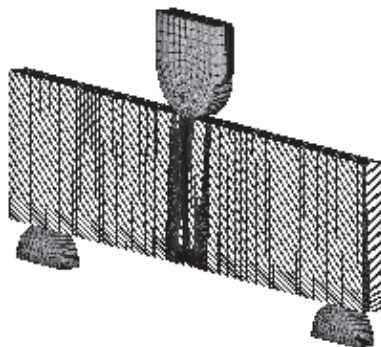


Рис. 1. Конечноэлементная сетка для моделирования испытаний падающим грузом двухфазного материала

полнотолщинные образцы, которые разрушают грузом массой 1–1,5 тс, поднятым на высоту 4–5 м. На разрушенной поверхности образцов, как правило, визуальнo определяют долю вязкой составляющей излома (ДВСИ), которая для большинства труб ответственного назначения не должна быть менее 90 %.

Доля вязкой составляющей излома зависит от химического состава стали, структурных и технологических факторов обработки [1–5], которых можно насчитать не менее пятнадцати, и они зачастую взаимообусловлены. Попытки создать статистические модели ДВСИ на основе

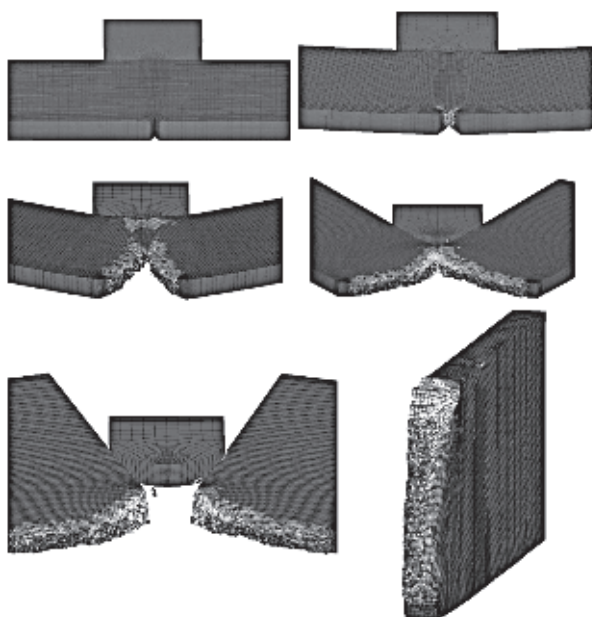


Рис. 2. Стадии разрушения образца при испытании падающим грузом, построенные при помощи разработанной модели

линейных или нелинейных уравнений множественной регрессии не увенчались успехом, а компьютерные программы расчета до настоящего времени созданы не были, очевидно, в силу специфики и сложности решаемой задачи. В связи с этим в данной работе в качестве основной цели были сформулированы задачи создания математической модели испытаний падающим грузом и ее использования для определения доли вязкой составляющей в изломе образца.

Математическая модель. Поскольку речь идет о динамических испытаниях, для разработки модели были использованы лицензионные компьютерные программы ANSYS и LS-DYNA. В качестве исходной была использована модель испытаний на ударную вязкость, изложенная в [6]. Эта модель показала хорошую сходимость расчетных значений ударной вязкости с результатами испытаний, и при ее помощи была составлена многофакторная регрессионная модель для технологических расчетов.

Для моделирования ИПГ была изменена геометрия образца и бойка, а также заданы параметры падающего груза. Трехмерная конечно-элементная модель показана на рис. 1. Она состоит из 117 660 восьми узловых элементов и имеет 397 749 степеней свободы. В качестве исходных данных в модель вводятся деформационная кривая статического растяжения, предел текучести, модуль Юнга, коэффициент Пуассона. В качестве критерия разрушения приняты предельные деформации и соответствующие им предельные напряжения. Предельные деформации определялись как логарифмическая величина пластической деформации $\epsilon_{\text{пред}} = -\ln(1 - \psi)$, где ψ — сужение в шейке, а предельные напряжения — истинные напряжения в момент разрушения. Зависимости деформирующих напряжений от степени деформации (реологические уравнения) задавали в виде соотношения $\sigma(\epsilon) = \sigma_{t0} + \alpha \epsilon^B$.

На рис. 2 представлены стадии разрушения образца при испытании падающим грузом, построенные с помощью разработанной и реализованной на персональном компьютере математической модели. Как видно, конечноэлементное моделирование ИПГ отражает все особенности пластической деформации и разрушения металла при заданных параметрах испытания.

Методика оценки ДВСИ по результатам расчета в ANSYS LS-DYNA. При визуализации результатов расчета конечноэлементной задачи



каждый конечный элемент на поверхности разрушения (см. рис. 2) в зависимости от степени деформации, предшествующей разрушению, окрашивается определенным цветовым оттенком. Анализ окрашенных поверхностей разрушения при помощи программ анализа изображений, например «ВидеоТест» или «Thixomet PRO», либо подпрограммы встроенной в ANSYS LS-DYNA, можно построить гистограмму распределения поверхностных элементов по цветам, что соответствует распределению элементов по величинам испытанных до разрушения деформаций.

Если предполагать, что при хрупком разрушении величина деформации не превышает 2 % [7, 8], то, используя этот критерий, на гистограмме распределения деформаций по поверхностным элементам можно определить долю хрупкой составляющей

$$XP = \int_0^{0,02} f(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (1)$$

Соответственно доля вязкой составляющей может быть определена как

$$BP(\%) = 100 - XP(\%). \quad (2)$$

В качестве примера на рис. 3 представлена характерная гистограмма распределения поверхностных элементов по деформациям после разрушения образца при ИПГ. Она получена при моделировании испытаний стального образца с пределом текучести 477 МПа при предельных деформациях 0,63.

Суммируя площадь всех элементов, которые имеют деформацию меньше 2 %, получаем, что в данном случае доля хрупкого разрушения близ-

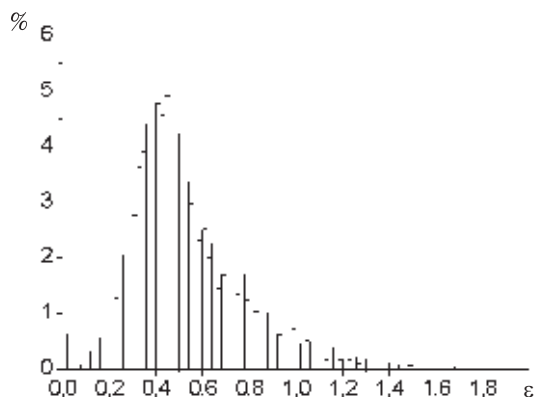


Рис. 3. Характерная гистограмма распределения поверхностных элементов по деформациям при разрушении образца после ИПГ

ка к нулю и соответственно доля вязкого практически составляет 100 %.

Тестирование математической модели. Разработанная математическая модель ИПГ была протестирована на зависимость ДВСИ от предела текучести материала. Были заданы кривые растяжения материалов с различным пределом текучести (рис. 4), который изменялся от 500 до 900 МПа, но с одинаковой интенсивностью деформационного упрочнения.

Результаты расчетов, выполненных по предлагаемой математической модели в программе в ANSYS/LS DYNA, дали зависимость, представленную на рис. 5, а, б в сравнении с экспериментальными данными. На рис. 5, б в качестве экспериментальных точек даны центры распределений ДВСИ для выборки прокатанных полос, имеющих долю вязкой составляющей, соответствующую значению ординаты. Всего на рис. 5, б отражены экспериментальные результаты по 2000 прокатанным полосам. Расчетные и экспериментальные результаты аппроксимированы сигмоидальной зависимостью Больцмана.

Полученная зависимость (см. на рис. 5) полностью согласуется с литературными данными [1, 9] и данными статистического анализа промышленных полос (см. рис. 5, б), что подтверждает работоспособность модели.

На следующем этапе работы был проведен компьютерный эксперимент по влиянию упрочнения стали при пластической деформации на вязкость разрушения. Интенсивность упрочнения задавали изменением коэффициентов α и β , которые являются параметрами аппроксимации $\sigma(\varepsilon) = \sigma_{T0} + \beta \varepsilon^\alpha$ зависимости напряжений от сте-

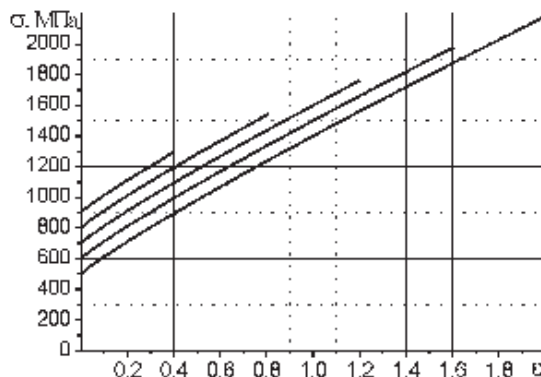


Рис. 4. Кривые растяжения для тестирования решения задачи о влиянии предела текучести на ДВСИ

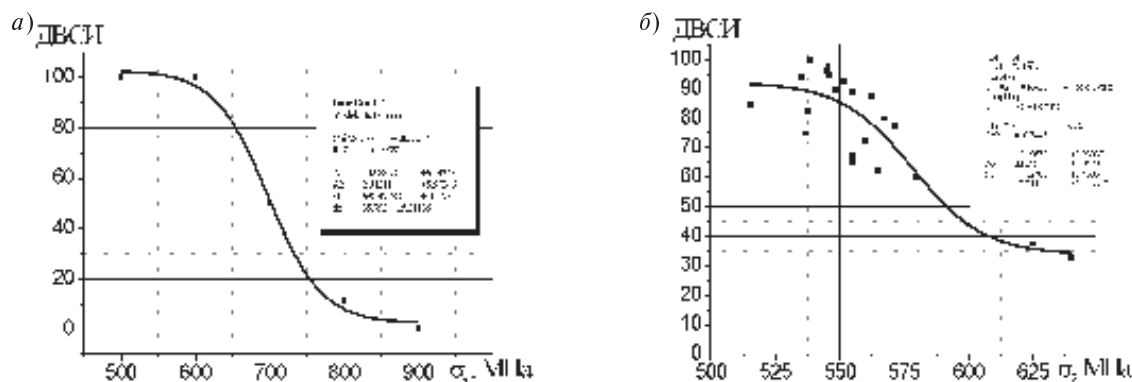


Рис. 5. Сравнение результатов компьютерного эксперимента и статистического анализа промышленных полос:

a — результаты эксперимента; *b* — результаты статистического анализа экспериментальных данных

пени деформации на ДВСИ. Диапазон варьирования коэффициента α составил от 500 до 1100 МПа, а коэффициента β — от 0,55 до 0,95.

На рис. 6 изображена расчетная зависимость доли вязкой составляющей поверхности излома после испытаний падающим грузом при $\sigma_T = 600$ МПа и предельной деформации $\epsilon_{\text{пред}} = 1,6$. Как видно, повышение значения предельных напряжений, рост которых происходит при увеличении параметра α , приводит к повышению ДВСИ. Это согласуется с представлениями о формировании типа разрушения (вязкое или хрупкое) [7,10], поскольку при росте α и $\epsilon_{\text{пред}} = \text{const}$ возрастает работа разрушения и соответственно увеличивается степень деформации каждого элемента до разрушения. На рис. 7 площадь под кривыми $\sigma(\epsilon)$ характеризует работу разрушения.

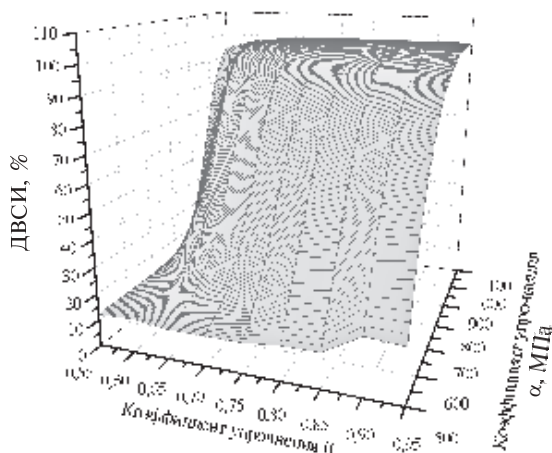


Рис. 6. Влияние коэффициентов упрочнения на значение ДВСИ ($\sigma_T = 600$ МПа; $\sigma_{\text{пред}} = 1,6$)

Аналогично снижение значений параметра β при постоянных $\epsilon_{\text{пред}}$ и α приводит к снижению работы разрушения при пластической деформации и снижению ДВСИ, что отражает зависимость на рис. 6.

Компьютерный эксперимент по влиянию структурной неоднородности на вязкость разрушения. Выпускаемые современной промышленностью низкоуглеродистые микролегированные трубные стали — в основном двухфазные, их структура имеет ферритную основу с включениями перлита или бейнита. Указанные структурные составляющие существенно различаются по уровню механических свойств и по поведению при деформации. Поэтому при расчете ДВСИ для каждой структурной составляющей принимаются свои реологические уравнения. Так, например, зависимость истинных напряжений от истинных деформаций для легированного феррита может быть аппроксимирована функцией

$$\sigma(\epsilon) = 600 + 900\epsilon^{0,9},$$

а для перлита — функцией

$$\sigma(\epsilon) = 714 + 1940\epsilon^{0,8}.$$

Исходные предельные деформации для феррита и перлита на основании анализа экспериментальных данных принимаются равными $\epsilon_{\text{Ф пред}} = 1,6$ для феррита и $\epsilon_{\text{П пред}} = 0,29$ для перлита. Допустимые напряжения для феррита и перлита определяются согласно кривой растяжения.

Влияние содержания второй структурной составляющей. Выполнен расчет ДВСИ для двухфазного материала, содержащего до 40 % перлита. На рис. 8 представлена расчетная схема для материала, содержащего 10 и 40 % перлита, включения которого распределены стохастически.

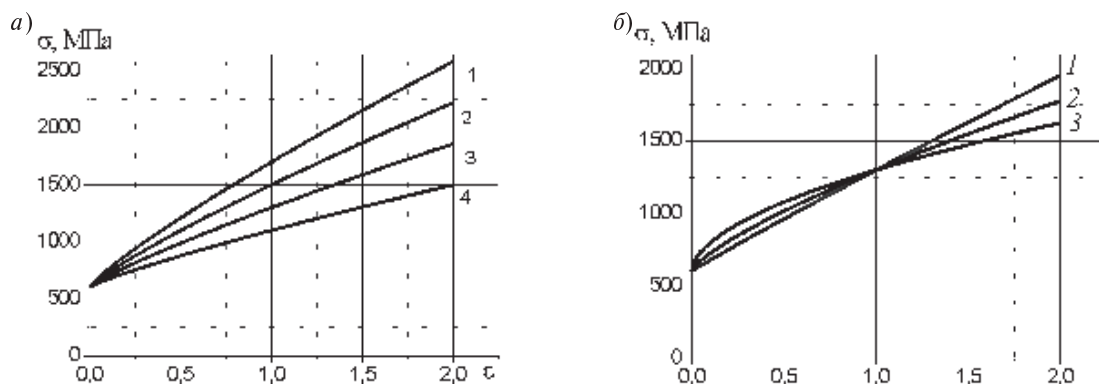


Рис. 7. Влияние параметров α и β на вид кривых растяжения при их аппроксимациях зависимостью $\sigma(\epsilon) = \sigma_{T0} + \alpha\epsilon^\beta$:
 а — влияние параметра α (при $\sigma_T = 600$ МПа, $\epsilon_{пред} = 1,6$, $\beta = 0,85$ и значениях α , равных 1100 (1), 900 (2), 700 (3), 500 МПа (4)); б — влияние параметра β (при $\sigma_T = 600$ МПа, $\alpha = 700$ МПа и $\beta = 0,55$ (1); 0,75 (2); 0,95 (3))

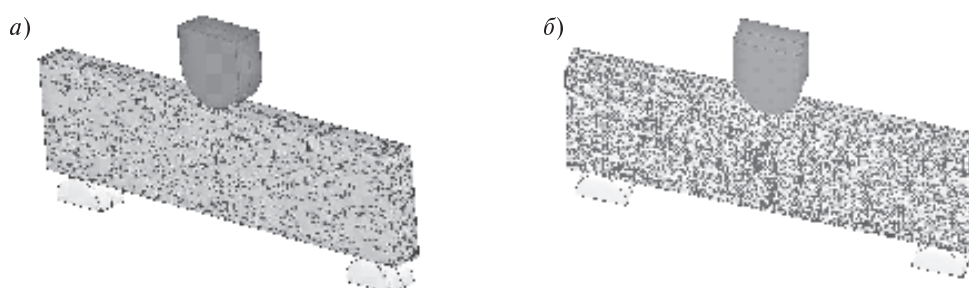


Рис. 8. Расчетная конечноэлементная модель двухфазного материала, содержащего 10 (а) и 40 (б) % перлита

Результаты расчетов ДВСИ в зависимости от количества перлита представлены на рис. 9, а. Аналогичная по характеру зависимость получается при пересчете содержания перлита на содержание углерода, если пользоваться равновесной диаграммой Fe—Fe₃C. Расчетные данные показывают, что увеличение количества перлита приводит к снижению ДВСИ, что полностью совпадает с результатами экспериментов [1]. Таким образом, для повышения ДВСИ необходимо снижать количество перлита в структуре или углерода в химическом составе сталей.

Влияние свойств структурных составляющих. В качестве основных свойств феррита и перлита, определяющих моменты начала их разрушения, использовали их предельные деформации при содержании перлита в структуре стали 10 и 40 %. Результаты компьютерного эксперимента представлены на рис. 10. Видно, что предельные деформации оказывают существенное влияние на величину ДВСИ.

В большинстве промышленных трубных марок стали количество перлита в структуре не превышает 10 %. Как показали результаты компьютерного эксперимента, величина ДВСИ в этом

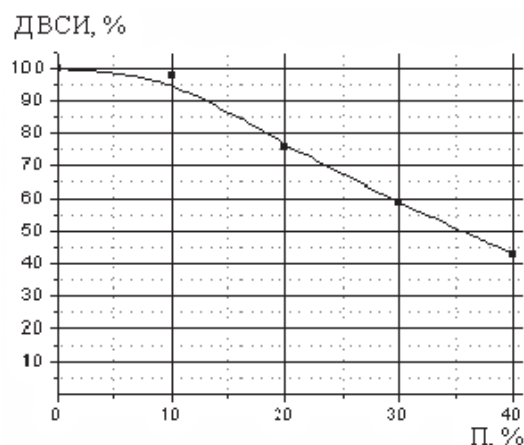


Рис. 9. Зависимость ДВСИ от количества перлита

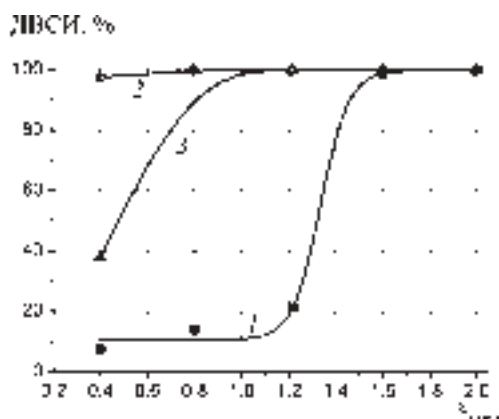


Рис. 10. Влияние предельных деформаций структурных составляющих на ДВСИ:
1 — феррита при содержании перлита 10 %;
2 — перлита при его содержании 10 %;
3 — перлита при его содержании 40 %

случае определяется лишь свойствами феррита. Следовательно, меняя предел текучести и пластичность ферритной фазы, можно влиять на ДВСИ при ИПГ. Изменять свойства феррита можно как за счет химического состава стали, так и за счет технологических факторов, например условий охлаждения металла после контролируемой прокатки.

Как показывают разработанная математическая модель и выполненный компьютерный эксперимент, изменение ДВСИ должно иметь закономерный характер. Однако при испытаниях падающим грузом трубных сталей в промышленных условиях ДВСИ не всегда поддается прогнозам и может неожиданно меняться в пределах от 0 до 100 %. Следовательно, изменение величины ДВСИ нельзя связывать только с изменением исследованных параметров.

В подтверждение существования случайного фактора были выбраны образцы стали одной марки категории прочности К60, прокатанные практически по одним режимам по технологии контролируемой прокатки, но имеющие значения ДВСИ от 15 до 92 %. Информация о свойствах этих образцов представлена в таблице.

Как видно по данным таблицы, механические свойства образцов практически одинаковы, а значения ДВСИ отличаются более чем в шесть раз. Таким образом, при исследовании ДВСИ необходимо искать не только закономерности, но и анализировать наличие слабого звена, связанного, вероятно, со структурными особенностями микрообъемов металла, которые вызывают аномально низкие значения предельных деформаций и напряжений при пластической деформации и разрушении образца при ИПГ.

Свойства образцов стали 10Г2ФБ

ДВС, %	σ_T , МПа	σ_B , МПа	σ_T/σ_B	δ , %	НВ
15	510	608	0,89	18	236
47	540	660	0,82	21	213
92	550	610	0,89	19	205

Разработанные компьютерная модель испытаний падающим грузом и методика оценки доли вязкой составляющей отражают особенности поведения материала при данном виде испытаний и позволяют прогнозировать поведение металлов. Показано, что значение ДВСИ зависит как от химического состава стали, так и от технологических особенностей изготовления листа, определяющих структуру металла. Компьютерные эксперименты продемонстрировали, что существуют закономерности формирования доли вязкой составляющей, однако наряду с закономерностями действует и случайный фактор, вызванный наличием в системе «слабого звена». Его присутствие может вызывать непрогнозируемое снижение вязкости разрушения из-за пониженных значений предельных деформаций.

Следующая задача изучения поведения сталей при испытаниях падающим грузом — анализ слабого звена и поиск путей его устранения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матросов, Ю.И. Сталь для магистральных трубопроводов [Текст] / Ю.И. Матросов, Д.А. Литвиненко, С.А. Голованенко. — М.: Металлургия, 1989. — 288 с.

2. Won Jong Nam. Effects of alloying elements on microstructural evolution and mechanical properties of induction quenched-and-tempered steels [Текст] / Won Jong Nam, Dae Sung Kim, Soon Tae Ahn //



Journal Of Materials Science.— 2003.— № 38.— P. 3611–3617.

3. **Kishore Babu, N.** Effect of austenitizing temperature and cooling rate on the structure and properties of a ultrahigh strength low alloy steel [Текст] / N. Kishore Babu, M.R. Suresh, P.P. Sinha, D.S. Sarma // Journal Of Materials Science.— 2006.— № 41.— P. 2971–2980.

4. **Коджаспиров, Г.Е.** Исследование влияния температуры, дробности деформаций и скорости охлаждения на структуру и свойства стали 09ГНБ [Текст] / Г.Е. Коджаспиров, Р.В. Сулягин.— МиТОМ.— 2005.— № 2.— С. 7–10.

5. **Hwang, B.** Correlation of Microstructure and Fracture Properties of API X70 Pipeline Steels [Текст] / B. Hwang, Young Min Kim, Sunghak Lee [и др.].— Metall. Mater. Trans. A.— 2005. Vol. 36A.— P. 725–739.

6. **Боровков, А.И.** Конечно-элементное моделирование и исследование двухопорного ударного изгиба стального образца с целью определения ударной вязкости стали [Текст] / А.И. Боровков,

А.С. Немов, Н.Г. Колбасников, А.М. Золотов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2007. № 3.— С. 53.

7. **Владимиров, В.И.** Физическая природа разрушения металлов [Текст] / В.И. Владимиров.— М.: Металлургия, 1984.— 280 с.

8. **Гуляев, А.П.** Вязкое и хрупкое разрушение [Текст] / А.П. Гуляев // МиТОМ.— 1977.— № 7.— С. 63.

9. **Hwang, B.** Correlation of Microstructure and Mechanical Properties of Thermomechanically Processed Low-Carbon Steels Containing Boron and Copper [Текст] / B. Hwang, Chang Gil Lee, Tae-Ho Lee // Metall. Mater. Trans. A.— 2010. Vol. 41A.— P. 85–96.

10. **Берштейн, М.Л.** Механические свойства металлов [Текст] / М.Л. Берштейн, В.А. Займовский.— М.: Металлургия, 1979.— 495 с.

11. **Сорокин, В.Г.** Марочник сталей и сплавов [Текст] / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин [и др.]; Под общ. ред. В.Г. Сорокина.— М.: Машиностроение, 1989.— 640 с.

УДК 523

В.Ф. Космач

КВАНТОВОСТЬ ОРБИТ ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Многочисленные попытки обнаружить закономерности в численном ряде значений радиусов орбит планет Солнечной системы (СС) предпринимались начиная с конца XVII века. В предлагаемой статье эти закономерности впервые раскрываются на основе достижений современных квантовой механики [1] и физики элементарных частиц [2].

Планеты СС образовались из облака микрочастиц в результате гравитационного воздействия Солнца. Эти микрочастицы с массой m , двигаясь в гравитационном потенциале Солнца, должны приобрести квантовые значения действия S , главного n и орбитального l чисел, полной энергии $E(n)$, импульса $p(n, l)$ и расстояния $r(n, l)$ до Солнца. Микрочастицы со временем образовали планеты вследствие гравитационного притяжения между собой и столкновений друг с другом. Можно обоснованно полагать, что наиболее вероятен процесс объединения микрочастиц, имеющих приблизительно одинаковые $\vec{p}(n, l)$ и $r(n, l)$, так как для таких частиц харак-

терны достаточно небольшие, во-первых, скорости их движения друг относительно друга и, во-вторых, расстояния между ними, поскольку они двигаются по приблизительно одинаковым орбитам $r(n, l)$. Вышесказанное позволяет сделать предварительный вывод о том, что планеты должны «помнить» те квантовые числа $S, n, l, p(n, l), r(n, l)$ микрочастиц, из которых они образовались и которые служат основой эффекта квантовой памяти планет, предположенного впервые в настоящей работе. Для планет вышеперечисленные квантовые величины являются усредненными по ансамблю микрочастиц, вошедших в состав планеты j , где j — номер планеты СС (указано в таблице).

Планеты СС имеют совершенно разные массы и орбиты движения, но их объединяет то, что гравитационное взаимодействие планет и Солнца подавляющим образом превосходит взаимодействие планет между собой и, следовательно, каждая планета имеет индивидуальный набор квантовых величин $S, n, l, p(n, l), r(n, l)$. Они опре-

делены Солнцем, и поэтому эти наборы для различных j можно сравнивать друг с другом. Наиболее четко эффект квантовой памяти должен проявляться для сравнительно легких планет (Марс и те, что легче него, т. е. $j = 1, 4-14, 19$ — см. табл.), так как такие планеты объединили в процессе своего образования относительно небольшое число микрочастиц с наиболее близкими наборами квантовых величин. Солнце своим гравитационным полем не позволяет планетам «забыть» эти наборы, которые были приобретены ими в процессе образования. Сувеличением масс планет следует ожидать уменьшения эффекта квантовой памяти.

В статье все необходимые расчеты выполнены в предположении, что орбиты планет и малых планет — круговые с радиусами, равными большой полуоси эллиптической орбиты, чья длина a_j (см. табл.) определена экспериментально [3], а единицей измерения служит астрономическая единица, а.е. = $1,496 \cdot 10^{13}$ см. Оправданием замены эллиптических орбит на круговые является то, что только в случае $j = 4$ эксцентриситет ор-

биты превышает 0,8, для всех же остальных j он меньше 0,3, и, следовательно, малая полуось меньше большой максимум на 5 %, чего вполне достаточно для правомерности допущений настоящей работы.

Хорошо известно соотношение [1]

$$r(n, l) = \frac{1}{2} \left[3n^2 - l(l+1) \right] \frac{\hbar^2}{m_e \alpha}, \quad (1)$$

где $r(n, l)$ — радиус орбиты электрона атома водорода, усредненный по радиальной волновой функции R_{nl} электрона; m_e — масса электрона; $\alpha = e^2$, e — заряд электрона.

Соотношение (1) может быть применено и для гравитационного потенциала, но для этого необходимо сделать замены $m_e = m_j$, $\alpha = \alpha_j = m_j m_0 \cdot G$, в которых m_j и m_0 — массы планеты j и Солнца ($j=0$), G — гравитационная постоянная. Следует также учесть, что, во-первых, для кулоновского (гравитационного) потенциала при заданном n_j число l_j может принимать значения $0, 1, \dots, n_j - 1$ и, во-вторых, в случае анализа СС n_j и l_j имеют смысл квантовых чисел, усредненных по ансамблю микрочастиц, вошедших в состав каждой планеты j . Поэтому n_j и l_j могут быть дробными числами, но при хорошей квантовой памяти планет отличие дробных чисел от ближайших целых должно позволять сделать однозначный выбор.

Оценим числа n_j и l_j ($j = 1-19$). Для таких оценок нужно найти значение «боровского радиуса» A , который является аналогом подобного радиуса a_0 для атома водорода. В случае атома во-

дорода из формулы (1) следует, что $r(1, 0) / a_0 = \frac{3}{2}$.

Если полагать, что Меркурий ($j = 1$) находится в состоянии $n_1 = 1$ и $l_1 = 0$, а равенство

$a_1(1, 0) / A = \frac{3}{2}$ справедливо для квантовой системы планет, тогда $A = 2 \cdot a_1(1, 0) / 3 = 0,258$ а.е.

Нахождение чисел n_j и l_j для других планет СС сводится к однозначному решению простейших уравнений. Найденные значения n_j и l_j представлены в таблице. Конечно, расчетные n_j и l_j были дробными числами, однако для сравнения расчетных $r_j(n, l)$ и экспериментальных a_j выбирались только целые n и l , которые оказались ближайшими к их дробным значениям. Выбор был практически всегда однозначным, так как сред-

Таблица 1

**Характеристики орбит планет (+)
и малых планет (–) Солнечной системы**

j	Планета	a_j , а.е.	k, n_j, l_j
1	Меркурий (+)	0,387	1,1,0
2	Венера (+)	0,723	2,2,1
3	Земля (+)	1,000	2,2,0
4	Икар (–)	1,078	2,2,0
5	Марс (+)	1,52	1,2,0
6	Евномия (–)	2,643	1,3,2
7	Юнона (–)	2,668	1,3,2
8	Церера (–)	2,766	1,3,2
9	Паллада (–)	2,768	1,3,2
10	Веста (–)	2,362	2,3,0
11	Ирис (–)	2,386	2,3,0
12	Геба (–)	2,426	2,3,0
13	Психея (–)	2,923	2,4,3
14	Гигия (–)	3,151	2,4,3
15	Юпитер (+)	5,2	2,5,3
16	Сатурн (+)	9,54	2,7,5
17	Уран (+)	19,2	2,9,2
18	Нептун (+)	30,1	2,11,1
19	Плутон (+)	39,4	1,10,0



нее отношение теоретических (r) и экспериментальных (a) данных получалось равным $(r/a) = 1,00 \pm 0,03$, но только для группы самых легких планет ($j = 1; 5; 19$) и группы малых планет ($j = 6-9$). Этой подсистеме планет ($j = 1, 5-9, 19$) единой СС был присвоен номер $k = 1$ (см. табл.) и принято, что $A_1 = A$. Следует обратить внимание, что в подсистему $k = 1$ вошли только легкие планеты, для которых эффект квантовой памяти максимален, и что Меркурий ($j = 1$) находится в основном состоянии $n_1 = 1$ и $l_1 = 0$. Последнее обстоятельство позволило предположить, что первая подсистема сформировалась значительно раньше второй ($k = 2$), так как одна из планет ($j = 1$) первой подсистемы успела за время жизни этой подсистемы достигнуть даже основного состояния, попадание на которое представляется крайне маловероятным сразу в момент рождения подсистемы ($k = 1$), поскольку Меркурий — ближайшая к Солнцу планета.

Для понимания закономерности формирования второй подсистемы планет СС решающим обстоятельством стало то, что Венера и Земля имеют очень близкие орбиты с учетом масштабов СС. Оценки показали, что такая близость орбит возможна, если для Венеры $n = 2$ и $l = 1$; а для Земли $n = 2$ и $l = 0$. Знание квантовых чисел n и l для Земли позволило найти с помощью соотношения (1) «боровский радиус» для второй подсистемы ($A_2 = 0,167$ а.е.) и затем рассчитать квантовые числа для всех планет этой подсистемы (табл. 1), но с точностью несколько меньшей, чем в случае $k = 1$. Для второй подсистемы $(r/a) = 1,00 \pm 0,08$, и, следовательно, дисперсия в случае $k = 2$ приблизительно в три раза превышает дисперсию для $k = 1$. Это означает, что квантовая память крупных планет ослабевает, и в результате разброс расчетных значений (r_j) относительно экспериментальных (a_j) увеличивается, однако в среднем «поведение» тяжелых планет — вполне предсказуемо. Необходимо отметить, что возникновение двух подсистем планет связано, возможно, с двумя этапами образования единой СС и что второй этап по своему энергоснабжению был значительно больше первого, так как отношение M_2/M_1 суммарных масс (M_k) планет подсистем $k = 1$ и $k = 2$ составляет примерно 10^3 . Столь большое энергоснабжение на втором этапе ($k = 2$) формирования СС могло значительным образом повлиять на планеты пер-

вого этапа ($k = 1$). В астрономии существует гипотеза, что малые планеты — осколки распавшейся планеты Фазтон, масса которой была равна приблизительно массе Марса и которая двигалась по круговой траектории с радиусом равным примерно $2,8$ а.е. [4]. Если эту гипотезу принять за рабочую и полагать, что время жизни Солнца и Земли равны $15 \cdot 10^9$ лет и $4,7 \cdot 10^9$ лет [2, 3], тогда грубые оценки показывают, что время жизни первой и второй планетарных подсистем равны соответственно $(7-8) \cdot 10^9$ лет и $(4-5) \cdot 10^9$ лет. Возможно, что на втором этапе формирования СС Меркурий совершил квантовый переход в основное состояние, а часть малых планет ($j = 10-14$) перешли из подсистемы ($k = 1$) в подсистему ($k = 2$).

Таким образом, СС представляет собой две пространственно совмещенные под действием Солнца огромные квантовые подсистемы, у каждой из которых своя система энергетических уровней, и планеты этих подсистем имеют возможность переходить как с одного энергетического уровня на другой в пределах своей подсистемы, так и на уровни другой подсистемы.

Цель настоящей работы состоит не в том, чтобы рассчитать траектории движения планет (для таких расчетов классическая механика — вне конкуренции), а в стремлении обратить внимание научного сообщества на необходимость создания квантово-механического метода расчета вероятностей переходов планет с одного энергетического уровня на другой для исследований прецессии и нутации оси вращения Земли, для расчетов периодов переворотов магнитного момента нашей планеты, ибо вероятно, что подобный квантовый переход, неоднократно наблюдался в мезозойской эре геологической истории Земли. Доказательством последнего утверждения могут служить экспериментально установленные периоды этой эры — триасовый, юрский, меловой, причем каждый из них делится на свои периоды, в течение которых происходили заметные изменения флоры и фауны Земли [4].

Практическую реализацию квантово-механического метода анализа СС следует начать с определения \hbar_{kj} для случая в $k = 1$ и $k = 2$. Расчеты величины \hbar_{kj} (он выражает суммарное действие S_{kj} и по своему физическому смыслу есть гравитационный аналог постоянной Планка для планеты j) были выполнены для всех планет и рассмотренных малых планет. В качестве

примера приведем эти величины для Меркурия ($j = 1, k = 1$) и Земли ($j = 3, k = 2$), найденные на основе равенства $A_k = \hbar_{kj}^2 / (m_j^2 m_0 G)$, которое является полным аналогом формулы для расчетов боровского радиуса для атома водорода: $\hbar_{11} = 0,744 \cdot 10^{46}$ эрг·с, $\hbar_{23} = 10,868 \cdot 10^{46}$ эрг·с. Величины \hbar_{11} , \hbar_{23} незначительно, но зависят от массы m тех микрочастиц, которые были основой формирования подсистем $k = 1$ и $k = 2$. Неравенство $m_1 < m_2$ для случаев $k = 1$ и $k = 2$ имеет ясный физический смысл и показывает, что рождение подсистемы $k = 1$ произошло раньше, чем подсистемы $k = 2$. Оценки, выполненные на основе ра-

венства $A_k = \hbar^2 / (m_k^2 m_0 G)$, показали, что $\frac{m_2}{m_1} = 1,24$; однако можно полагать, что $m_1 \approx m_2 \approx 0,3 \cdot 10^{-13}$ эВ. Столь малое значение массы микрочастицы пока трудно обосновать. Если

предполагать, что микрочастица является электронным нейтрино, тогда величина $0,3 \cdot 10^{-13}$ эВ лишь приближается к нижней границе (10^{-12} эВ) диапазона возможных масс нейтрино, приведенного в монографии [2].

В заключение надо отметить, что с большой вероятностью должна существовать квантовая память Солнца, других светил, а также темного вещества Вселенной о большом взрыве. Обнаружение такой памяти, несомненно, поможет пониманию законов развития Вселенной с учетом не только видимого, но и темного вещества.

Автор выражает большую благодарность заведующему кафедрой экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета профессору Я.А. Бердникову и доценту этой кафедры А.В. Головину за конструктивную критику и доброжелательность в процессе обсуждения результатов настоящей работы.

Статья поступила в редакцию 18.11.2010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау, Л.Д. Квантовая механика. Нерелятивистская теория [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц.— М.: Физматгиз, 1963.— 704 с.
2. Окунь, Л.Б. Физика элементарных частиц [Текст] / Л.Б. Окунь.— М.: Наука, 1988.— 272 с.
3. Бабичев, А.П. Физические величины [Текст]: справочник / А.П. Бабичев Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский [и др.].— М.: Энергоатомиздат, 1991.— 1232с.
4. Советский энциклопедический справочник [Текст] / Под ред. А.М. Прохорова.— М.: Советская энциклопедия, 1989.— 1632 с.

УДК 378.147

И.И. Баранова

ТЕСТИРОВАНИЕ В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ ОБУЧЕНИЯ РУССКОМУ ЯЗЫКУ КАК ИНОСТРАННОМУ

В период формирования единого мирового образовательного пространства перед высшей школой Российской Федерации стоит задача повышения качества образования. В решении этой задачи важное место занимает организация эффективного контроля академической деятельности студентов.

В высших учебных заведениях Российской Федерации все большее распространение получает тестирование как форма проверки знаний студентов по изучаемым дисциплинам. Активно функционирует Государственная система тестирования по русскому языку как иностранному, которая предусматривает уровневый подход к оценке владения русским языком как иностранным (РКИ). В основу Российской государственной системы тестирования положены принципы легитимности, равных прав и возможностей, гласности, конфиденциальности, преемственности, научной обоснованности и развития, системного и последовательного учета динамики формирования коммуникативных, речевых, языковых навыков и умений, комплексности (необходимость включения в систему тестирования не только тестов общего владения русским языком, но и специальных тестов владения языком профессионального общения и др., рассчитанных на конкретного потребителя), регулирования связи между обучением и общественными потребностями, эффективности (использование современных технических средств для управления работой по организации тестирования, проверке результатов, созданию тестов [1, с. 7–8]).

Российская государственная система тестирования включена в европейскую структуру языкового тестирования ALTE (Ассоциация лингвистических тестов Европы). Уровни владения русским языком как иностранным соотносятся

с уровнями владения другими европейскими языками следующим образом:

- элементарный уровень (ТЭУ) — А 1;
- базовый уровень (ТБУ) — А2;
- первый уровень (ТРКИ-1) — В 1;
- второй уровень (ТРКИ-2) — В 2;
- третий уровень (ТРКИ-3) — С 1;
- четвертый уровень (ТРКИ-4) — С 2.

Существует система регламентирующих документов, которые устанавливают требования к I, II, III, IV уровням владения русским языком как иностранным. Унифицированная система тестирования способствует процессу интеграции России в международное образовательное пространство и создает основу для обеспечения международного признания языковых сертификатов.

Участие в Государственной системе тестирования по русскому языку иностранных граждан — одно из важных направлений деятельности кафедр русского языка, осуществляющих языковую подготовку иностранных студентов. Тестирование как форма контроля знаний стало неотъемлемой частью системы обучения иностранных студентов русскому языку.

Тестовый контроль предполагает проверку сформированности языковых навыков и речевых умений в области чтения, говорения, письма и аудирования, которые необходимы для решения определенных коммуникативных задач в соответствии с уровнем владения русским языком. Тест на проверку уровня владения РКИ включает 5 субтестов: «Грамматика. Лексика», «Чтение», «Аудирование», «Говорение», «Письмо».

I сертификационный уровень достаточен для удовлетворения основных коммуникативных потребностей учащегося в социально-бытовой и социально-культурной сферах общения. Этот

уровень обеспечивает необходимую коммуникацию в условиях языковой среды (учеба, работа, отдых). Кроме того, владение русским языком как иностранным в объеме I сертификационного уровня необходимо для поступления в высшие учебные заведения России. Иностранные студенты, обучающиеся по программе предвузовской подготовки в СПбГПУ, составляют значительную группу тестируемых на I уровень владения русским языком.

За последние 3 года тестирование на I сертификационный уровень прошли 183 студента. Опыт проведения тестирования показывает, что в основном соискатели справляются с предъявляемыми требованиями. Наибольшие трудности у испытуемых вызывает выполнение субтеста «Аудирование», так как восприятие информации на иностранном (русском) языке на слух без опоры на печатный текст — наиболее сложное среди речевых умений при овладении русским языком.

На этапе предвузовской подготовки обучение русскому языку ведется на стилистически дифференцированном учебном материале. Важный аспект обучения — овладение научным стилем речи, так как учебно-профессиональная сфера общения — определяющая в высших учебных заведениях. Следует отметить, что в настоящее время при тестировании на I уровень владения русским языком не проверяется сформированность коммуникативной компетенции в учебно-профессиональной сфере общения. В вузах существует опыт создания тестов по отдельным профилям обучения. Типовые тесты для проверки коммуникативной компетенции в учебно-профессиональной сфере общения получили название профессиональных модулей. Однако проверка уровня владения русским языком в учебно-профессиональной сфере общения остается одной из нерешенных проблем тестирования, а создание тестов, ориентированных на профиль будущего обучения, — важной методической задачей для разработчиков тестов.

Растет число соискателей, желающих пройти тестирование на II сертификационный уровень владения русским языком. Это студенты из стран Европы, Китая, США, обучающиеся в вузах Санкт-Петербурга по программам включенного обучения, а также студенты, заканчивающие обучение по программе бакалавриата.

Владение русским языком в объеме II сертификационного уровня позволяет кандидату вести профессиональную деятельность на русском языке

как в качестве специалиста инженерно-технического, экономического и гуманитарного профилей.

В системе высшего образования Российской Федерации сертификационное тестирование на II уровень владения русским языком может проводиться как итоговое государственное аттестационное испытание (экзамен), дающее право на получение как диплома бакалавра инженерно-технического, экономического и гуманитарного (за исключением филологического) профилей так и диплома магистра инженерно-технического, экономического и гуманитарного профилей лицам, поступившим в магистратуру с дипломом бакалавра нероссийского вуза.

II сертификационный уровень владения русским языком как иностранным требует от кандидатов серьезной языковой подготовки. Грамматически правильное оформление речи — необходимое условие для достижения коммуникативных целей в различных сферах общения, поэтому особое внимание испытуемых требует выполнение субтеста «Грамматика. Лексика». Внимание к формированию языковой компетенции для достижения II уровня владения РКИ неслучайно. II уровень владения РКИ предполагает знание достаточно большого объема лексики, обеспечивающей общение в рамках тематического и интенционального содержания данного уровня. Одна из целей субтеста «Грамматика. Лексика» — проверка правильности функционально-стилистического употребления грамматических и лексических единиц на материале текстов официально-делового и газетно-публицистического стилей.

Следует подчеркнуть, что субтест «Грамматика. Лексика» включает в себя темы, традиционно трудные для изучающих русский язык как неродной. В частности, тест проверяет знание лексической и семантической сочетаемости различных частей речи: существительных, прилагательных, глаголов. В данном случае речь идет о паронимах. Паронимы — это слова, имеющие сходство в морфологическом составе и, следовательно, в звучании, но различающиеся по значению. К паронимам относятся однокорневые слова, например: мирный — мировой — миролюбивый. Паронимы — один из источников «трудностей» литературной речи: сходство слов вообще, а тем более сходство в морфологическом составе — причина их смешения. При сопоставлении паронимов акцент делается на семантических различиях слов, в связи с чем выясняют-



ся их сочетательные возможности. Проблема правильности — неправильности при употреблении паронимов возникает тогда, когда сопоставляются паронимы, принадлежащие к одной части речи. Например:

- | | |
|--|--|
| Он сейчас нуждается в ...
сочувствии. | А) дружном;
Б) дружеском;
В) дружеском;
Г) дружественном. |
| Друзья учатся в ... школах:
Виктор в 47-й, а Олег —
в 23-ей. | А) различных;
Б) разнообразных;
В) разных. |
| Желаю вам удачи и ...
успехов в научной
деятельности. | А) дальнейших;
Б) дальних;
В) далеких;
Г) удаленных. |

При обращении к толковым словарям современного русского литературного языка не всегда возможно получить необходимую информацию. Например, в «Толковом словаре» С.И. Ожегова прилагательное «дружелюбный» объясняется как дружески расположенный. Прилагательное «дружественный» толкуется как: 1) дружелюбный, дружеский; 2) взаимно благожелательный (преимущественно о государствах и отношениях между ними). Прилагательное «различный» толкуется как 1) содержащий различия, несходный; 2) разнообразный, всевозможный. Прилагательное «разнообразный» толкуется как различный, неодинаковый по каким-нибудь признакам. Таким образом, сложность для иностранных соискателей-нефилологов заключается в том, что различение паронимов основано на знании их сочетательных возможностей. Эти знания приобретаются иностранными студентами в ходе достаточно длительного изучения языка и практики общения с его носителями. На уровень коммуникативной компетенции существенно влияет также обращение иностранных студентов к средствам массовой информации и чтение художественной литературы. Кроме того, паронимы, широко представленные в лексической системе русского языка, не выделяются как особые группы в других языках, например в китайском.

Значительную часть контингента иностранных студентов, обучающихся в вузах Российской Федерации, составляют студенты из Китая. Для этой категории учащихся прохождение тестирования на все уровни владения русским языком представляет определенные трудности, которые объясняются, с одной стороны, разницей

в системах русского и китайского языков, с другой стороны, — отсутствием достаточного языкового опыта изучения иностранного языка у китайских учащихся. Несмотря на то, что китайские студенты обучаются в языковой среде, их опыт общения на русском языке практически ограничивается рамками учебных занятий. В процессе обучения китайских студентов и при подготовке их к тестированию необходимо учитывать этнокультурные и этнопсихологические особенности данного контингента учащихся. К этнопсихологическим особенностям китайцев можно отнести: высокий уровень мнемических способностей (запоминание, классифицирование), развитую интуицию, зрительный канал восприятия, активное использование аналогии, контекстуальной догадки и др. [2, с. 8]. Учет этих особенностей позволит оптимизировать учебный процесс и более эффективно подготовиться к прохождению тестирования.

III уровень владения русским языком как иностранным соответствует высокому уровню коммуникативной компетенции во всех сферах общения и позволяет вести профессиональную деятельность на русском языке в качестве переводчика, журналиста, менеджера и др. Тестирование на III уровень владения русским языком проходят, как правило, выпускники гуманитарных факультетов преимущественно из стран Европы.

Основные трудности для тестирующихся представляют субтесты «Аудирование», «Письмо». При выполнении субтеста «Аудирование» проверяется способность тестируемого воспринимать всю полноту информации социально-культурного характера, выраженную как в эксплицитной, так и в имплицитной форме; оценивается также умение понимать формы речевого поведения говорящего и стоящие за ними цели речевого воздействия. Сложность восприятия на слух предлагаемых текстов заключается и в том, что в них возможно использование языковых средств современной русской разговорной речи, а также малоупотребительных языковых единиц (профессионализмов, жаргонизмов и т. д.), которые достаточно часто встречаются в речи носителей современного русского литературного языка.

При выполнении субтеста «Письмо» проверяется умение тестируемого достигать определенных коммуникативных целей при составлении собственного письменного сообщения на основе анализа и оценки предъявляемой информации; умение продуцировать письменный текст — рас-

суждение (эссе-рассуждение). Тестируемый должен владеть приемами структурной организации текста, использования внутритекстовых средств связи, а также владеть приемами аргументации, убеждения и оценки. При написании эссе необходимо использовать такие обязательные компоненты, как определение проблемы и причины ее возникновения, характеристику общественного и личного отношения к проблеме, предположение о возможном ее решении. Для выполнения такого задания требуется высокий уровень языковой и культуроведческой подготовки тестируемого.

Таким образом, тестирование стало неотъемлемой частью системы контроля знаний иностранных студентов по русскому языку. Преподавателям общеобразовательных и специальных дисциплин, работающим с иностранными студентами в вузе, необходимо знать и учитывать в практической деятельности уровень владения русским языком иностранных студентов на разных этапах обучения, что будет способствовать созданию оптимальных условий для их успешной академической деятельности.

В соответствии с приказом Министерства образования Российской Федерации № 2606 от 20 июня 2003 года в центрах тестирования вузов России организовано тестирование по русскому языку как иностранному иностранных граждан и лиц без гражданства для приема в гражданство Российской Федерации (сертификат о прохождении государственного тестирования по русскому языку — необходимое условие получения гражданства Российской Федерации). Сертификат подтверждает владение русским языком на уровне, достаточном для общения в устной и письменной форме в условиях языковой среды.

Опыт проведения данного вида тестирования показывает, что круг соискателей широк и разнообразен как по возрасту, так и по уровню владения русским языком. С одной стороны, это жители бывших республик Советского Союза (Украина, Грузия, Армения, Молдова), которые получили образование на русском языке и владеют русским языком как родным. Для этой категории тестируемых трудности носят прежде всего психологический характер. Как правило, испытуемые успешно подтверждают соответствие своего уровня владения русским языком требованиям Российской государственной системы тестирования.

Как показывают наблюдения, соискатели данной группы без труда справляются с выполнением субтестов «Грамматика. Лексика», «Ауди-

рование», «Устная речь». Наибольшее количество ошибок допускается при выполнении субтестов «Чтение» и «Письмо». Основные трудности при выполнении субтеста «Письмо» тестируемые испытывают в той его части, где проверяется умение построить письменное монологическое высказывание на предложенную тему в соответствии с коммуникативной установкой. При оценке уровня сформированности умений продуцирования письменного высказывания учитывается:

соответствие текста, созданного тестируемым, цели, сформулированной в задании;

соответствие количества смысловых единиц текста, созданного тестируемым, заданному объему содержания;

логичность и связность изложения информации;

владение языковым и речевым материалом, лексико-грамматическая правильность речи, свобода использования языковых средств.

Основные ошибки, допускаемые при тестировании, не относятся к коммуникативно значимым, то есть не являются ошибками, влияющими на решение коммуникативной задачи (орфографические и пунктуационные ошибки).

Трудности, которые испытывают тестируемые при выполнении субтеста «Чтение», объясняются недостаточно сформированными умениями извлекать из текста необходимую информацию. Не все кандидаты имеют опыт выполнения заданий в тестовой форме и при выполнении некоторых заданий ориентируются не столько на информацию предложенного текста, сколько на свой жизненный опыт, что приводит к ошибкам в выполнении заданий теста.

Другая категория граждан, проходящих тестирование на право получения гражданства Российской Федерации, — это иностранные граждане не дальнего зарубежья (Афганистан, Бангладеш, Ливан, Марокко, Вьетнам и др.), которые вступили в брак с гражданами Российской Федерации и проживают на ее территории. Эта категория соискателей подразделяется на две группы:

иностранцы, которые обучались в российских вузах;

иностранцы, которые выучили русский язык самостоятельно в условиях языковой среды.

Иностранцы, имеющие опыт изучения русского языка в академических условиях, более успешно справляются с выполнением субтеста «Грамматика. Лексика», который проверяет такие умения:



правильно употреблять предложно-падежные формы имен в контексте высказывания;

правильно использовать глагольные формы с учетом контекста и ситуации, в том числе инфинитив, видо-временные формы, глаголы движения без приставок и с приставками;

использовать структуру простого и сложного предложения в предложенных контекстах [3].

Кроме того, кандидаты данной группы лучше владеют навыками чтения и письменной речи, что позволяет им выполнить задания соответствующих субтестов. Выполнение субтестов «Аудирование» и «Говорение» также не вызывает у них значительных трудностей.

Иностранные граждане, которые выучили русский язык самостоятельно, владеют навыка-

ми восприятия речи на слух и навыками устной диалогической речи. Однако в недостаточной степени владеют навыками чтения, письменной речи, испытывают трудности в грамматическом оформлении речи. Для данной категории необходима организация специальных занятий и индивидуальный подход в подготовке к тестированию.

Организация тестирования иностранных граждан по русскому языку создает условия для объективного контроля сформированности языковых навыков и речевых умений, позволяет определить и сертифицировать уровень владения русским языком как иностранным. Совершенствование системы тестирования — одна из актуальных задач современной теории и практики преподавания русского языка как иностранного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балыхина, Т.М. Что такое русский тест? Российская государственная система тестирования граждан зарубежных стран по русскому языку (ТРКИ — TORFL) [Текст] / Т.М. Балыхина. — М.: «Русский язык», 2006 — 56 с.

2. Балыхина, Т.М. От методики к этнометодике. Обучение китайцев русскому языку: проблемы и пути их преодоления: Монография / Т.М. Балыхина, Юйцзян Чжао. — М.: Изд-во РУДН, 2010. — 344.

УДК 378.147:159.9

И.Б. Афанасьева

ФОРМИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ УМЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ОБУЧЕНИЯ

Развитие мирового сообщества характеризуется такими технологиями общественного производства, управлять которыми может только высокоинтеллектуальная, самоактуализированная личность. Поэтому на систему образования возлагается большая ответственность за организацию образовательного процесса, обеспечивающего личностное, деятельностное и интеллектуальное развитие учащихся (чему посвящены работы таких авторов, как И.А. Зимняя, В.В. Сериков, А.И. Сурыгин, В.И. Панов, Ю.Г. Фокин, М.А. Холодная, А.В. Хуторской и др.).

Специфические черты прикладной геометрии как науки и как учебной дисциплины определяют ее особое положение в ряду базисных направлений развития личности. Назначение начертательной геометрии состоит в развитии пространственного, логического, абстрактного мышления, творческих качеств личности, вни-

мания, наблюдательности, в формировании пространственного воображения и пространственных представлений, интеллектуальных умений, а также в обеспечении геометро-графической грамотности. Проблеме интеллектуального развития студентов в процессе обучения циклу графических дисциплин посвящены труды ученых К.А. Вольхина, В.В. Степаковой, Л.А. Найниш, В.И. Якунина и др.

Основное условие эффективности обучения — наличие у студентов интеллектуальных умений, формирование которых должно осуществляться в неразрывной связи с изучением содержания дисциплины (понятия, теоремы, решение задач по начертательной геометрии). Достижение целей обучения зависит, в частности, от сформированности у студентов общих и специальных приемов учебной деятельности. Общие приемы используются в разных обла-

тях знаний, специфические — отражают особенности изучаемой дисциплины и применяется в пределах данной области знаний [4, 6]. Познавательная деятельность включает в себя всю систему определенных действий и нужных для этого знаний. Если эти приемы будут входить в содержание обучения как метазнания, то будет обогащаться метакогнитивный опыт студентов [8], что соответствует целям интеллектуального воспитания в процессе обучения.

Е.Н. Кабанова-Меллер, Н.Ф. Талызина и другие исследователи считают интеллектуальные умения одним из показателей общего уровня умственного развития учащихся [4, 6]. Н.А. Менчинская понятие «интеллектуальное умение» трактует как сознательное владение рациональными приемами выполнения основных мыслительных операций (приемы умственной деятельности). Интеллектуальные умения носят обобщенный характер, поскольку в этом случае имеет место овладение общими приемами умственной деятельности, применяемыми в различных областях и по отношению к разному содержанию.

В психолого-педагогической литературе приводятся различные определения приемов умственной деятельности. В некоторых исследованиях прием умственной деятельности понимают как логическую операцию или совокупность логических операций, подчиненную разрешению задач определенного класса. К логическим операциям авторы относят: абстрагирование, сравнение, обобщение; к логическим действиям — доказательство, опровержение. Совокупность их — это прием умственной деятельности. Д.Н. Богоявленский под приемом умственной деятельности понимает систему процессов или операций анализа, синтеза, абстракции, обобщения и других, специально организованных для решения задач (определенного типа и разной степени обобщенности).

Следуя Е.Н. Кабановой-Меллер и Н.Ф. Талызиной, под приемами умственной деятельности мы понимаем способы, которыми она осуществляется и которые могут быть выражены в перечне действий (правило, рекомендация, инструкция и др.) [4, 6].

Некоторые авторы не выделяют приемы анализа и синтеза, так как, по их мнению, вся познавательная деятельность осуществляется на основе этих процессов, присутствующих в любом приеме в скрытом виде. Другие считают, что в основе интеллектуальной деятельности лежат

мыслительные операции: анализ и синтез, классификация, обобщение, аналогия, сравнение, подведение под понятие, установление причинно-следственных связей и т. д. [4, 6]. Кроме этого, исследователи выделяют общие и частные интеллектуальные умения. Первые обеспечивают решение широкого класса задач с использованием общелогических правил и обобщенных схем действий, они применимы в разных видах учебной деятельности. Вторые способствуют решению задач с использованием специфических правил, т. е. отражают специфическое содержание учебной дисциплины.

Анализ исследований по приемам умственной деятельности и формированию интеллектуальных умений показал, что большинство авторов в качестве основных приемов умственной деятельности выделяет анализ и синтез, сравнение, обобщение, классификацию и др. Все указанные приемы не являются равноценными с точки зрения решения разных задач. Они могут быть целевыми, т. е. играть главную роль, и вспомогательными, обслуживающими основной прием. Одни приемы могут включать в себя другие. Например, прием обобщения включает в себя приемы выделения главного, сравнения и др. Владение совокупностью приемов умственной деятельности называют умением думать.

В педагогических исследованиях выявлены два возможных уровня формирования интеллектуальных умений: 1) эмпирический (без осознания учащимися используемых приемов умственной деятельности); 2) теоретический (осознанное применение учащимися приемов). Для реализации развивающей функции образования необходим второй уровень формирования приемов. Процесс обучения в этом случае организуется следующим образом: во-первых, дается общая характеристика приема или формулируется его определение; во-вторых, дается правило как ориентир для использования приема.

Анализ процесса обучения в ряде общеобразовательных школ показал [2], что приемы умственной деятельности не являются предметом усвоения учащимися, а формируются стихийно. Это отрицательно сказывается на умственном развитии учащихся и, как следствие, на качестве их знаний. Демонстрация или заучивание тех или иных приемов умственной деятельности непродуктивны в юношеском возрасте. Поэтому процесс формирования интеллектуальных умений учащихся целесообразно строить в соот-



ветствии с определенными психолого-педагогическими теориями: теорией умственного развития (Д.Н. Богоявленский, Н.А. Менчинская, Е.Н. Кабанова-Меллер и др.) и теорией поэтапного формирования умственных действий П.Я. Гальперина, Н.Ф. Талызиной.

На основе анализа этих теорий и с учетом специфики учебной дисциплины (начертательной геометрии) мы выделяем пять этапов формирования интеллектуальных умений, которые опираются на структурные компоненты познавательной деятельности личности, и определяем содержание деятельности преподавателя и студентов по формированию интеллектуальных умений на каждом из этапов.

1. **Диагностический этап** (структурный компонент познавательной деятельности личности — цель). На данном этапе преподаватель ведет наблюдение за учебной деятельностью студентов, анализирует письменные и устные ответы, проводит тестирование, устанавливает уровни сформированности интеллектуальных умений, по результатам диагностики ставит цели учебной деятельности. Студенты выполняют практические работы, включающие задания на приемы умственной деятельности, отвечают на вопросы преподавателя в процессе учебной деятельности.

2. **Мотивационный этап** (компонент — мотив). Преподаватель ставит задачи перед студентами в овладении приемом через анализ работ учащихся, разбор достоинств и недостатков, использование проблемно-поисковых методов. Студенты принимают поставленную задачу и осознают необходимость в овладении соответствующим приемом умственной деятельности.

3. **Ознакомительный этап** (компонент — объект). Преподаватель разъясняет суть приема, раскрывает перечень составляющих его действий, вводит правило-ориентир. Студенты усваивают содержание приема, характеристики действий в составе приема и т. д.

4. **Формирующий этап** (компонент — образец). Преподаватель организует практическую деятельность студентов по формированию умения. Учащиеся выполняют практические задания двух видов: ориентированные на усвоение отдельных составляющих действий приема и направленные на формирование самого приема.

5. **Совершенствующий этап** (компонент — действия). Преподаватель организует самостоятельную и творческую учебную деятельность всех видов. Студенты применяют сформированные

умения в учебно-познавательной деятельности, осуществляя перенос приема на другие темы и т. д.

Контроль и коррекция учебной деятельности в качестве отдельных этапов не выделяются, так как контроль осуществляется на всех этапах, и с учетом его результатов проводятся корректирующие действия по формированию и закреплению соответствующего умения. В процессе целенаправленной работы педагога по формированию приемов умственной деятельности учащиеся разного уровня продвигаются от этапа к этапу в разном темпе, с различным содержанием формируемых приемов, с разной формой и мерой помощи со стороны преподавателя.

Наличие у студентов сформированных приемов учебно-познавательной деятельности способствует их интеллектуальному воспитанию. Это соответствует основополагающему принципу современной концепции образования — принципу приоритета развивающей функции в обучении. Приемы познавательной деятельности сначала являются предметом усвоения, а потом — его средством. Формирование геометрических понятий происходит с помощью таких приемов умственной деятельности, как анализ и синтез, сравнение объектов и их свойств, установление и использование аналогии, обобщение и конкретизация понятий, выведение следствий из определения понятия, подведение под понятие, классификация и др. Эти приемы также необходимы студентам для овладения интеллектуальными умениями на каждом этапе.

В данной статье мы рассмотрим теоретические основы формирования только некоторых важнейших приемов, а именно составление предписаний по распознаванию понятий и сравнение. Признаки понятия могут быть простыми и составными. Нас интересуют такие понятия, которые связаны между собой некоторыми отношениями. Признаки таких понятий имеют дизъюнктивную структуру и являются составными. Признаки могут быть представлены в виде простого перечня или в виде алгоритмического предписания по распознаванию понятия. В результате обобщения деятельности, связанной с составлением конкретного предписания по распознаванию понятий, студенты вместе с преподавателем осваивают обобщенный прием «составление предписаний по распознаванию понятий». Каждый из перечисленных признаков в целом принимается как элементарное высказывание (их внутренняя структура и связь не

учитываются). Связь признаков тем или иным логическим союзом, показывающая их отношение между собой, — логическая структура признаков. Если признаки соединены дизъюнктивно, то каждый из них достаточен для принадлежности исследуемого объекта множеству, составляющему объем какого-либо понятия. Для построения предписания по распознаванию понятий важно, чтобы указываемые признаки были достаточными для выделения интересующих нас объектов. Логическая структура признаков задает структуру операций по проверке признаков (с точностью до перестановки операций). К признакам, на основе которых строятся алгоритмические предписания по распознаванию понятий, предъявляются следующие дидактические требования: однозначности признаков (одинаковая воспринимаемость их всеми студентами) и возможности их легкого выявления. Первое требование выполняется «автоматически» (при условии, что учащиеся усваивают необходимое для этого содержание). Для выполнения второго требования на основе анализа шагов соответствующего предписания преподаватель составляет учебную карту. После того, как предписание разработано и студенты знают, как им пользоваться, составляются различные схемы распознавания сложных понятий.

К моменту изучения начертательной геометрии в вузе предполагается, что прием сравнения у студентов уже сформирован, в противном случае его необходимо начать формировать с первых занятий, так как сравнение лежит в основе всех приемов умственных действий. Различия в сформированности приема сравнения могут быть обусловлены не только недостаточной обученностью учащегося данному приему, но и принадлежностью индивида к таким различным когнитивно-стилевым параметрам, как «аналитичность» (склонность ориентироваться на выявление различий в ряду объектов) и «синтетичность» (склонность ориентироваться на выявление сходства в ряду объектов) [8].

Рассмотрим процесс формирования приема сравнения в соответствии с выделенными этапами. На **диагностическом этапе** преподаватель, приступая к формированию приема сравнения, прежде всего должен провести диагностику сформированности этого приема у первокурсников (показатель — осознание учащимися этого приема). Целям диагностики могут служить два вида заданий на сравнение, направленных на выяв-

ление уровня сформированности, во-первых, отдельных составляющих действий приема сравнения (выделение существенных и несущественных свойств, выделение общих и различных свойств, выбор основания сравнения и др.), во-вторых, самого приема сравнения (характер основания сравнения, сколько признаков отличия и сходства установлено, сделан ли вывод из сравнения и др.).

На **мотивационном этапе**, выявив уровень сформированности умения сравнивать, необходимо создать атмосферу заинтересованности студентов в овладении этим приемом. Преподаватель подробно анализирует каждую работу по основным структурным компонентам сравнения, подводя студентов к мысли, что для правильного выполнения сравнения объектов необходимо знать сущность и состав действия сравнения.

На **ознакомительном этапе** происходит осмысление сути приема сравнения и правил его реализации. В зависимости от результатов диагностики ознакомительный этап может состоять из двух ступеней: 1) осознания учащимися составляющих действий приема сравнения; 2) разъяснения сути приема сравнения, выделения его содержания и введения правила-ориентира. Первая ступень необходима, если получены неутешительные результаты диагностики. Для того чтобы научить студентов выделять существенные свойства объектов, отличать их от несущественных, психологи рекомендуют варьировать несущественные признаки и свойства при постоянстве существенных (мы варьируем эпюры при введении понятий, теорем и т. д.). В этом случае учащиеся осознают и устойчивые существенные свойства, и те, которые не меняют принадлежности объекта, предмета к объему понятия. На второй ступени разъясняется суть приема сравнения формулируется его определение. Затем в процессе беседы выделяют содержание этого приема и вводят (фиксируют) правило-ориентир.

На **формирующем этапе** необходимо провести актуализацию имеющихся знаний учащихся о геометрических объектах, их свойствах и подвести к новым понятиям при выполнении заданий определенного типа. В результате студенты самостоятельно на разном материале проводят сравнение в соответствии с усвоенным правилом, достаточно убедительно и логично объясняют свои действия.

На **совершенствующем этапе** преподаватель создает условия для сравнения различного учеб-



ного материала, стимулирует применение алгоритмических предписаний, проверяет сознательность выполнения каждого шага и способствует применению приема сравнения для более глубокого изучения программного материала. Студенты не только правильно понимают и формулируют сущность операции, проводят планомерное обобщающее сравнение по существенным признакам, но и осуществляют перенос приема сравнения в другие ситуации и другие области знания.

Разработанная нами технология обучения базируется на специальном конструировании содержания учебной дисциплины [2, 5, 7–9], форм и методов обучения (в рамках «обогащающей» модели) с учетом различных индивидуально-типологических особенностей студентов. Нами отобраны общие и специфические приемы, необходимые студентам для управления собственной интеллектуальной деятельностью, и разработана программа их формирования при обучении конкретному геометрическому содержанию [1]. Средства обучения начертательной геометрии: использование специальных учебных и геометрических задач, задачного и алгоритмического подходов в обучении, методов обучения как способов переработки элементов учебной информации. Все это позволяет преподавателю организовать управление познавательной деятельностью студентов на всех этапах учебного познания.

При характеристике учебных и геометрических задач принято выделять их сложность и трудность. Сложность задачи определяется объективными свойствами проблемной ситуации, составом ее элементов и числом связей между ними, степенью их изменчивости и неопределенности. Отражение сложной ситуации субъективно воспринимается человеком как трудность, мера переживания которой зависит от индивидуально-психологических способностей, наличия опыта, уровня развития интеллекта, общей подготовки, знаний, умений, навыков и др. Для учащихся элемент трудности в решении задач является фактором их интеллектуального развития. Ученые утверждают, что слишком трудные и слишком легкие задачи тормозят интеллектуальное развитие личности [2, 3, 8]. В процессе обучения решению задач преподавателю необходимо дифференцировать сложность и трудность задач, знать эти трудности и уметь помочь студентам их преодолеть.

Анализ содержания дисциплины показал, что целесообразно рассмотреть геометрические

и учебные задачи в классификации Л.Н. Ланды и Л.М. Фридмана. В результате были выделены 10 групп задач. В их числе четыре группы геометрических задач:

1) относящиеся к определенным классам, общий метод решения которых выражается предписанием;

2) с некорректным заданием условий (задачи с недостающими и с избыточными данными);

3) составляемые студентами по готовым проекционным моделям (эпюрам);

4) составляемые студентами на основе использования решенной ранее задачи;

Кроме того, были выделены шесть групп учебных задач на составление:

5) схем определенных понятий;

6) предписаний по распознаванию понятий, связанных отношением;

7) предписаний по решению геометрических задач определенного типа;

8) упражнений для подведения объекта под понятие;

9) классификационных схем взаимосвязи понятий;

10) информационных схем-моделей элементов содержания начертательной геометрии.

Для каждой группы задач разработаны средства, с помощью которых осуществляется обучение их решению: алгоритмический и задачный подходы в обучении начертательной геометрии и соответствующие группе задач приемы. Таким образом, обогащение умственного опыта и формирование интеллектуальных умений студентов происходит в процессе решения задач выделенных групп при специальном наборе заданий когнитивного, креативного, оргдеятельностного типов. В указанные группы не включены геометрические задачи, не относящиеся к определенному классу. Для решения таких задач применяется аналитико-синтетический метод, которому студенты специально обучаются.

Учебная литература содержит огромное количество готовых задач, которые студенты решают в процессе изучения дисциплины. Однако психологами доказано, что умение решать задачи и умение составлять их — это совершенно разные умения. Составить одну задачу во много раз полезнее, чем решить несколько готовых. Самостоятельное составление задач — творческий процесс, предполагающий понимание ее структуры. Все сказанное относится и к задачам с избыточными и недостающими данными.

Результаты анализа процесса обучения решению геометрических задач позволили сделать вывод: выделение типов и классов задач, использование общих методов решения задач определенного типа приводит к тому, что учащиеся не воспринимают каждую задачу как новую. В противном случае студенты испытывают значительные трудности при их решении. Обучение решению задач окажется успешным только в том случае, если учащиеся будут управлять своей деятельностью с помощью специфических и общих приемов, составленных под руководством преподавателя. Преподавателю целесообразно разработать для учащихся с низким уровнем сформированности интеллектуальных умений в дополнение к приемам решения задач еще и подсказки различного уровня, разной психологической направленности.

В процессе обучения начертательной геометрии мы реализуем программу формирования общих и специфических приемов умственной деятельности [1] на основе использования теории П.Я. Гальперина, где в качестве ориентировочной основы действия выступает определенный прием, а также согласно выделенным этапам (по Ю.М. Колягину): 1) осмысления содержания задачи; 2) поиска решения и составления плана решения; 3) осуществления плана решения; 4) обобщения найденного решения («взгляд назад»).

На этапе осмысления учащиеся осознают условие и требование задачи, разрабатывают отдельные элементы условия, производят поиск необходимой информации в своей памяти, соотносят с этой информацией условие и заключение задачи, выполняют построение эпюры и т. п. Такая деятельность способствует обогащению метакогнитивного опыта студентов.

На этапе поиска — при составлении плана решения задачи — студент должен подвести задачу под известный тип, приемлемые методы решения, наметить план решения и т. д. На этом этапе у учащихся формируется умение целесообразно варьировать способы решения познавательной проблемы, умение выявлять специфические особенности проблемы, формируется стремление осуществлять выбор действий и отыскивать кратчайший путь достижения цели. В процессе учебной деятельности на этом этапе обогащается когнитивный опыт (составляется схема решения задачи) и интенциональный опыт личности.

На этапе осуществления решения задачи студент должен реализовать план решения и офор-

мить решение. На этом этапе формируются: умение вскрывать причинно-следственную связь посылки и заключения; стремление к обоснованию каждого шага решения проблемы; умение действовать в соответствии с планом; умение воспроизводить решение задачи. Таким образом, происходит обогащение метакогнитивного опыта личности.

На этапе обобщения решения фиксируется конечный результат решения задачи, проводится его критический анализ, поиск путей рационализации решения, исследуются особые и частные случаи и т. д. На данном этапе у студентов формируются умения оценивать правильность выбранных путей решения поставленной проблемы, исследовать различные варианты постановки задачи в зависимости от изменения условий, обобщать задачу. У студентов появляется желание изучить различные подходы к решению проблемы и стремление отыскать рациональный способ ее решения. Таким образом, обогащаются когнитивный, метакогнитивный и интенциональный опыты личности.

На всех этапах развиваются такие интеллектуальные способности, как обучаемость, креативность, конвергентность. Результатом решения задачи является нахождение какого-то знания, способа, модели. В этом состоит когнитивный аспект задачи. Результатами решения задач групп 1, 4, 5, 6 являются предписания определенного типа, поэтому для обучения их решению целесообразно использовать алгоритмический подход. Учебные задачи групп 7, 8, 9 решаются с помощью специальных приемов умственных действий. Для обучения решению задач групп 2, 3 используются эвристические приемы. Проанализировав и систематизировав более 30 различных эвристических приемов решения задач, И.И. Ильясов выделил в процессе их решения три фазы (табл. 1) [3]: 1) анализ условия задачи; 2) поиск решения; 3) проверка решения.

Критерием распределения приемов по фазам решения служит степень определенности состава эвристического приема, которая зависит от полноты знания о составе операций и последовательности их осуществления. Если студент знает все необходимые данные для осуществления приема решения задачи, то такой прием наиболее определен с точки зрения его выполнения, а по механизму он репродуктивен. В случае, если знания о приеме не полные, он является наименее определенным. Если

Таблица 1

Эвристические приемы решения задач

Фазы решения задачи	Приемы решения задачи
1 фаза — анализ условия	Выделение главного, искомого; отнесение явлений задачи к объектам и процессам; первичное моделирование их свойств; установление основной трудности задачи
2 фаза — поиск неизвестного	<p><i>1 этап</i> — доопределение условий: развертывание определений понятий, относящихся ко всем явлениям задачи; выведение других характеристик явлений задачи как следствий наличия у них свойств, заданных в определениях; вторичное моделирование выведенных новых свойств явлений; сближение данных и требований задачи: устранение лишних условий в формулировках.</p> <p><i>2 этап</i> — поиск неизвестного с помощью более определенных по содержанию приемов: нахождение и использование сходной задачи; определение области поиска неизвестного; разбивка задачи на части.</p> <p><i>3 этап</i> — поиск неизвестного с помощью менее определенных по содержанию приемов: обобщение задачи; конкретизация задачи; переконструирование явлений задачи; формулирование и решение обратной задачи; выдвижение любых гипотез</p>
3 фаза — проверка и анализ гипотез	Проверка выдвинутых гипотез; анализ достоинств и недостатков гипотез; рассмотрение причин непригодности и отвержения гипотез; выявление сходства идей в гипотезах

же недостающие знания можно вывести из какого-то общего знания, то прием — промежуточный по определенности.

Общий принцип состоит в том, что сначала следует использовать репродуктивные и более определенные по механизму приемы решения задач. Действия на первой фазе не дают содержательно новой информации, они позволяют лишь четко зафиксировать данное и искомое,

а также их явные, задаваемые формулировкой задачи характеристики в полном и систематическом виде. На 1 этапе второй фазы необходимо применять дедуктивные выводные приемы. На 2 этапе следует переходить к использованию менее репродуктивных эвристических приемов с одновременным нарастанием степени их эвристичности. На 3 этапе применяются продуктивные приемы. Третья фаза дает возможность

Таблица 2

Распределение эвристических приемов решения задач по этапам

Этапы решения задач	Приемы решения задач	ЗИНД	ЗГПМ
1 — осмысление содержания задачи	1) выделение данного, искомого; 2) выделение связей между данными; 3) построение модели изображения; 4) составление задачи по готовой проекционной модели	+ + + —	+ + — +
2 — поиск решения	5) развертывание определения понятий, использующихся в задаче; 6) выведение следствий из условий (синтез); 7) выведение следствий из требования (анализ); 8) устранение избыточных данных и определение недостающих данных; 9) переконструирование явлений задачи; 10) использование сходной задачи	+ + + + + +	+ + + — + +
3 — составление плана	11) оформление записи решения задачи	+	+
4 — взгляд назад	12) составление обратных задач; 13) обобщение задач; 14) конкретизация задачи	+ + +	+ + +

установить реализуемость или нереализуемость гипотез. Эта фаза следует не обязательно после 3 этапа второй фазы. Гипотезы о возможном способе решения могут появиться и после 2-го этапа второй фазы. Если гипотеза появилась, то ее фиксируют, затем осуществляют ее проверку и анализ на любом шаге решения.

Сопоставление фаз решения задач с этапами методики обучения их решению показывает, что все фазы соответствуют этапам осмысления содержания задачи, поиску решения, составления плана и «взгляду назад». В соответствии с этим приемы решения задач (табл. 2), система-

тизированные И.И. Ильясовым (1–3, 5–7, 9–12, 13, 14) и составленные нами (4, 8, 11), распределены по этапам решения задач. Также отмечено использование (+) или неиспользование (–) приемов при решении задач с недостающими данными (ЗИНД) и задач по готовой проекционной модели (ЗГПМ) (см. табл. 2).

Мы считаем, что использование предложенных средств в процессе обучения начертательной геометрии будет способствовать достижению целей интеллектуального развития и воспитания личности и, следовательно, реализации личностных функций студента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Афанасьева, И.Б.** Психодидактический подход к обучению в вузе [Текст] / И.Б. Афанасьева. — Фундамент.исслед. и инновации в техн.ун-тах: Матер ХП Всерос.конф. по проблемам науки и высшей шк. — СПб, 14 мая 2008. — СПб: Изд-во СПбГПУ, 2008. — С. 314–315.

2. **Гельфман, Э.Г.** Психологические основы конструирования учебной информации (проблема интеллектоемких технологий преподавания) [Текст] / Э.Г. Гельфман, М.А. Холодная, Л.Н. Демидова // Психологический журнал. — 1993. № 3. — С. 38–45.

3. **Ильясов, И.И.** Система эвристических приемов решения задач [Текст] / И.И. Ильясов. — М., 2001. — 154 с.

4. **Кабанова-Меллер, Е.Н.** Формирование приемов умственной деятельности и умственное раз-

витие учащихся [Текст] / Е.Н. Кабанова-Меллер. — М.: Просвещение, 1968. — 183 с.

5. **Ланда, Л.Н.** Алгоритмизация в обучении [Текст] / Л.Н. Ланда. — М.: Просвещение, 1966. — 522 с.

6. **Талызина Н.Ф.** Педагогическая психология [Текст] / Н.Ф. Талызина. — М.: Академия, 1998. — 288 с.

7. **Пойа, Дж.** Обучение через задачи [Текст] / Дж. Пойа // На путях обновления школьного курса математики: сборник / Сост. В.А. Гусев. — М.: Просвещение, 1978. — С. 220–226.

8. **Холодная, М.А.** Психология интеллекта. Парадоксы исследований [Текст] / М.А. Холодная. — СПб.: Питер, 2002. — 272 с.

9. **Хуторской, А.В.** Современная дидактика [Текст] / А.В. Хуторской. — СПб.: Питер, 2001. — 544 с.

УДК 378.416

Е.И. Тучкевич

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ МАГИСТРОВ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «ДИЗАЙН»

Высшее образование, позволяющее получить знания в области компьютерного дизайна, приобретает особую актуальность, так как в области рекламы и дизайна возникла острая необходимость в высококвалифицированных кадрах художников и дизайнеров, владеющих навыками работы с графическими программными продуктами.

Федеральный государственный стандарт

Приказом от 13.01.2010 № 15 Министерства образования и науки РФ утвержден Федеральный государственный стандарт высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) подготовки магистров по направлению 072500 «Дизайн». Он представляет собой совокупность требований, обязательных при реализации ос-



новых образовательных программ магистратуры по направлению подготовки 072500 «Дизайн» образовательными учреждениями ВПО, имеющими государственную аккредитацию на территории Российской Федерации.

Новая, отличительная характеристика ФГОС ВПО — использование понятий компетенция, компетентность и компетентностный подход при разработке и формировании образовательных программ ВПО.

Компетентность, компетенция, компетентностный подход

Выявление сущности компетентностного подхода следует начинать с определения ключевых понятий — компетентность и компетенция.

Компетенция — это *способность* личности успешно выполнять деятельность определенного вида на основе сформированных знаний, умений, навыков, опыта деятельности и профессионально значимых личностных качеств [1].

Компетентность — *качество личности*, характеризующее ее способность осуществлять определенную деятельность в соответствии с установленными требованиями [1].

Компетенция — «*содержание*» компетентности, т. е. те знания, навыки, опыт, умения, с помощью которых личность проявляет компетентность [2].

Выделим три положения, определяющих компетентность:

компетентность — это сложное умение осуществлять определенную деятельность в соответствии с заданными требованиями;

компетентность как сложное (вторичное) умение основана на освоенных знаниях, первичных умениях, навыках, многообразном опыте творческой деятельности, применения норм, эмоционально-нравственных оценок, предшествующем опыте соответствующей деятельности;

компетентность формируется, развивается и совершенствуется в процессе освоения и осуществления соответствующей деятельности.

Проанализируем суть термина «компетентностный подход», а также характеристики компетентностного подхода и критерии, по которым можно судить, что применяемый подход является компетентностным.

Главная характеристика состоит в том, что компетентностный подход ориентирован на разработку систем целей и планируемых результатов обучения.

Одна из основных характеристик такого подхода связана с определением компетентности как умения осуществлять деятельность. Важное требование компетентностного подхода: цели и планируемые результаты обучения по образовательной программе должны соответствовать той деятельности, к которой готовят выпускников программы.

Основные особенности компетентностного подхода:

ориентация целей и планируемых результатов обучения прежде всего на умения и навыки, причем не только узкопрофессиональные, но и так называемые переносимые умения и навыки (те, которые могут быть сформированы в контексте обучения профессиональной деятельности, но имеют более широкое применение), а также социально-личностные умения и навыки;

сопряженность целей обучения и планируемых результатов обучения с требованиями работодателей и образовательных стандартов.

Перечисленные особенности и характеристики соответствуют следующему определению: «Компетентностный подход — это методология проектирования целей образовательного процесса, суть которой — в представлении целей образовательных программ и планируемых результатов обучения с выраженным акцентом на деятельностный компонент в терминах умения решать обобщенные задачи профессиональной деятельности и/или индикаторов ожидаемого профессионального поведения и необходимых для этого знаний и понимания, умений и навыков, опыта, позволяющих выпускникам программы проявлять компетентность» [2].

Существует более лаконичное определение: «Компетентностный подход — это методология проектирования *педагогического процесса*, основанная на представлении цели и задач обучения в виде перечня *компетенций*, обобщенно представляющих знания, умения, навыки, опыт деятельности, личностные качества, которыми должен обладать обучающийся по завершении образовательной программы» [1].

В СПбГПУ на факультете управления и информационных технологий (ФУИТ) разработана и реализована на базе компетентностного подхода в соответствии с ФГОС ВПО принципиально новая основная образовательная программа подготовки магистров по направлению 072500 «Дизайн». На примере реализации данной образовательной программы и рассмотрим новую технологию формирования ключевых профессиональных компетенций магистров.

Профессиональные компетенции магистров по направлению подготовки 072500 «Дизайн»

В соответствии с ФГОС ВПО магистр по направлению подготовки 072500 «Дизайн» должен обладать общекультурными и профессиональными компетенциями.

К профессиональными компетенциями (ПК) по этому направлению относятся:

художественно-творческая деятельность (ПК-1);

проектная деятельность (ПК-2);

информационно-коммуникативная деятельность (ПК-3);

производственно-технологическая деятельность (ПК-4);

организационно-управленческая деятельность (ПК-5);

научно-исследовательская деятельность (ПК-6);

способность выбирать необходимые методы исследования и творческого исполнения, модифицировать существующие и разрабатывать новые методы исходя из задач конкретного исследования либо художественного творчества (ПК-7);

педагогическая деятельность (ПК-8);

экспертно-консультационная деятельность (ПК-9);

инновационная деятельность (ПК-10) [3].

Основная образовательная программа по направлению подготовки 072500 «Дизайн», как и все ООП, разработанные на базе ФГОС ВПО, должна содержать общенаучный и профессиональный циклы. В свою очередь циклы имеют базовую и вариативную часть. Особое внимание в свете компетентностного подхода и формирования ключевых профессиональных компетенций представляет формирование базовой части профессионального цикла ООП для магистров по этому направлению подготовки. В статье описан опыт разработки в СПбГПУ новой педагогической технологии формирования ключевых профессиональных компетенций учащихся на примере дисциплины «Компьютерный дизайн», одной из составляющих базовой части профессионального цикла ООП для магистров по направлению подготовки «Дизайн».

Технология формирования ключевых профессиональных компетенций

Технология обучения — это научно обоснованная система упорядоченных действий (дея-

тельность), которая реализуется в рамках педагогической системы преподавателями и обучающимися с использованием организационных форм, методов и средств обучения, обеспечивая воспроизводимое, гарантированное и эффективное достижение цели и задач обучения [1].

Разработаны основы технологии формирования ключевых профессиональных компетенций направления. К ним относятся:

обширное методическое обеспечение курса на базе новых подходов формирования учебных пособий;

структурирование материала дисциплин по смысловым блокам как необходимое условие его правильного и полного усвоения; основной принцип структурирования «от простого к сложному»;

логичное выстраивание последовательности смысловых блоков в процессе преподавания дисциплин;

оптимальный баланс практического и теоретического материала в рамках как отдельного занятия, так и курса в целом, позволяющий наилучшим образом реализовывать возможности студентов;

принципиально новый — с активным применением современных технических средств — подход к практическим занятиям;

подход к домашним заданиям студентов, ориентированный на самостоятельное решение ими реальных задач будущей профессиональной деятельности;

разнообразное техническое оснащение занятий, новейшая проекционная и мультимедийная техника;

Формирование ключевых профессиональных компетенций на примере проектирования и реализации образовательного процесса дисциплины «Компьютерный дизайн» в СПбГПУ

Рассмотрим преимущества нового подхода к формированию ключевых компетенций на примере проектирования и реализации образовательного процесса дисциплины «Компьютерный дизайн».

Обширное методическое обеспечение курса выразилось в следующем:

разработано и издано в издательстве СПбГПУ принципиально новое авторское учебное пособие по дисциплине «Компьютерный дизайн» (предполагает формирование ключевых компетенции ПК-1 — ПК-7, ПК-10);



создан конспект лекций (теоретическая часть курса) для каждого студента (предполагает формирование ключевых компетенции ПК-1 — ПК-7, ПК-10);

выпущено пособие, в котором собраны основные практические рекомендации для повседневной работы.

Лекционный материал, сформированный на принципиально новой основе. В формате лекций дается общая технология, позволяющая в дальнейшем применять полученные знания к любым задачам (решение общей задачи). Рассматриваются реализации технологии в различных программных средах, которые выстраивают правильное соотношение между общими (технологическими) понятиями в рамках изучаемого предмета и частными (методическими) действиями по решению конкретных задач.

Структурирование материала курса от простого к сложному. Структурирование материала — необходимое условие его полного усвоения. Способы построения структуры могут быть различными, но многолетний опыт обучения по направлению «Дизайн» в СПбГПУ позволил выделить структуру «от простого к сложному». В начале курса даются базовые понятия и алгоритмы, ставятся достаточно простые задачи. По мере углубления теоретической подготовки и появления дополнительных навыков, задачи усложняются; в финале курса студенты способны не просто использовать изученные технологии и методы, но и анализировать поставленные задачи, выбирать адекватные средства их решения.

Логичное построение изложения дисциплины. Теоретический и практический материал каждого курса строится таким образом, чтобы каждый следующий его элемент логично (в рамках выбранной системы структурирования) следовал за предыдущим либо был с ним связан. Отдельное внимание уделяется межпредметным связям, что позволяет повысить эффективность усвоения каждого курса за счет использования его элементов в рамках изучения других предметов.

Подход к формированию практических заданий. Практические задания подбираются таким образом, чтобы при их выполнении основной акцент делался на новый, только что изученный материал. Каждое задание основано на решении реальной дизайнерской задачи, что повышает уровень подготовки студентов к самостоятельной профессиональной деятельности.

Разработка эффективных заданий для самостоятельной работы. Задания для самостоятельной работы предусматривают не только развитие конкретных инструментальных навыков, но и творческих способностей, самостоятельного мышления. Здесь особую роль играют межпредметные связи, позволяющие, например, в работах по технологиям обработки векторной графики использовать знания, полученные при изучении композиции и колористики.

Оптимальный баланс практического и теоретического материала. На практических занятиях лекционный материал подкрепляется конкретными задачами и средствами их решения. Важнейший элемент каждого занятия — возможность практически применить каждое средство или инструмент сразу после или даже прямо в процессе объяснения. Здесь также активно применяются технические средства: проектор с выводом на экран действий преподавателя и использование технологии «NetOp» (режим демонстрации работы), позволяющей студентам увидеть весь ход событий на своих мониторах. Разрыв между описанием действия и самим действием сводится к минимуму.

Разработка самостоятельных заданий, максимально развивающих навыки и творчество. Самостоятельные задания ориентированы на решение реальных дизайнерских задач и разработаны так, что условием их успешного выполнения стало максимальное использование как ранее полученных теоретических знаний и навыков, так и материала параллельно изучаемых предметов. Успешно выполненные самостоятельные задания часто становятся основой портфолио студента и создают базу для его будущей профессиональной деятельности.

Технологии проведения итоговой аттестации по дисциплине включают следующие моменты: теоретический тест, позволяющий проконтролировать усвоение теоретического (лекционного) материала;

практическое задание с ограничением по времени, которое с достаточной точностью показывает уровень инструментальных навыков студента;

самостоятельное творческое задание, позволяющее судить об общей профессиональной пригодности студента, что необходимо при обучении творческой специальности. Именно этот аспект часто упускается при обучении компьютерному дизайну как специальности прежде все-

го технологической. Особое внимание, уделяемое данному вопросу, можно отнести к сильным сторонам обсуждаемой технологии обучения.

Непрерывный процесс консультаций студентов и выпускников с преподавателями через форум факультета. Современные средства коммуникации позволяют продолжить процесс обучения за пределами аудиторных занятий. В предложенной технологии обучения активно используется обратная связь вида «вопрос/ответ» и «работа/комментарий» в рамках форума факультета. В отличие от разнообразных профессиональных сообществ в Сети, здесь выпускник может получить отзыв не только компетентный, но и дружественный, что очень важно для начинающего дизайнера.

Использование современных технических средств при проведении лекций. Проектор и мультимедиа-презентации увеличивают визуальную составляющую процесса обучения и повышают его эффективность.

Высокое техническое оснащение. Каждый слушатель имеет индивидуальное рабочее место, полностью оснащенное новейшим оборудованием и программным обеспечением для качественного освоения материала.

Обучение на базе созданных в СПбГПУ авторизованных учебных центров компаний Adobe и Autodesk позволяет:

гарантированно предоставлять студентам лицензионное программное обеспечение ведущих мировых производителей, а также официальные обучающие материалы Autodesk и Adobe;

знакомить студентов с новейшими, еще только выходящими или готовящимися к выходу на рынок разработками в изучаемых программных пакетах;

гарантировать высокое качество учебного процесса за счет привлечения преподавателей, имеющих сертификаты международного уровня;

координировать учебные программы с официальными учебными программами компаний-

производителей ПО и готовить студентов к международной сертификации;

получать сертификат Autodesk, зарегистрированный в базе сертификатов Autodesk, а также всемирно признаваемый сертификат ACE (Adobe Certified Expert);

выполнять выпускные дипломные работы по реальным дизайнерским заказам потенциальных работодателей.

Размещение работ на выставках, на форуме и в официальных представительствах факультета в социальных сетях. Если выставки в рамках учебных заведений — достаточно традиционный и популярный способ дополнительной мотивации студентов, то использование для этой цели социальных сетей — дело новое. Главное его достоинство — приобщение студента к общепринятой мировой практике выставлять свои работы на сетевое обозрение в профессиональных или рекламных целях. Размещение работ в официальных представительствах факультета, с одной стороны, повышает ответственность авторов за качество выставляемых работ, с другой, — предоставляет им дружественную стартовую площадку для дальнейшего развития и продвижения.

Разработка в СПбГПУ новой педагогической технологии формирования ключевых профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВПО предполагает достижение целей и результатов обучения по дисциплине «Компьютерный дизайн» с четко выраженным акцентом на деятельностный компонент, т. е. формирование у магистров по направлению подготовки 072500 «Дизайн» умения решать обобщенные задачи профессиональной деятельности и необходимых для этого знаний и понимания, умения и навыков, опыта, профессионального поведения, позволяющих выпускникам программы проявлять ключевые профессиональные компетенции ПК-1 — ПК-7, ПК-10 в соответствии с ФГОС ВПО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гомоюнов, К.К. Теория и практика высшего профессионального образования [Текст] / К.К. Гомоюнов, В.Н. Козлов, В.И. Никифоров, А.И. Сурыгин. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. — 140 с.

2. Арсеньев, Д.Г. Современные подходы к проектированию и реализации образовательных программ в вузе [Текст] / Д.Г. Арсеньев, А.И. Суры-

гин, Е.В. Шевченко. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. — 81 с.

3. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования по направлению подготовки 072500 «Дизайн» (квалификация (степень) «магистр») [Текст].

КОММЕНТАРИИ К СТАТЬЕ М.В. КОВТУН, О.П. РОДИОНОВОЙ И С.В. ЛУПУЛЯКА «БЫСТРЫЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ»

При ответе на вопрос о быстродействии алгоритмов число N неизвестных значений искомой функции считают параметром. Быстрым обычно называют метод, который позволяет найти N неизвестных за $O(N)$ или $O(N \log^\beta N)$ арифметических действий, где β — фиксированное число, во многих случаях имеющее порядок единицы. Такие алгоритмы называют также оптимальными или, соответственно, почти оптимальными по вычислительной (арифметической) работе, а также алгоритмами, имеющими линейную (относительно числа неизвестных) и почти линейную сложность. Более содержательный ответ о быстродействии дает оценка отношения $\varepsilon / A(N_\varepsilon)$, где $A(N_\varepsilon)$ — арифметическая работа, затрачиваемая на получение решения с погрешностью ε . Однако она применяется редко, поскольку требует анализа значительного числа факторов. Кроме того, она не умаляет важность оценок по числу арифметических действий. В тексте статьи [10] вопреки ее названию мы не находим анализа вычислительной трудоемкости и, следовательно, быстродействия вообще¹.

«Обоснование» быстродействия содержится в двух предложениях на стр. 147 статьи:

«Разработанный алгоритм... основан на использовании минимизации квадратичного функционала с линейными ограничениями. Благодаря этому подходу достигается высокая скорость вычислений.»

¹ Заметим, что анализ быстродействия (эквивалентно эффективности, экономичности, вычислительной стоимости и т. д.) приближенных методов и его приемы — одно из центральных направлений вычислительной математики и математического моделирования, развивавшееся со времен Эйлера.

На самом деле представленный численный метод никак нельзя отнести к быстрым. Более того, «методом» его можно назвать только в кавычках, так как положенный в его основу подход неверен и не позволяет вообще получить приближенные решения контактных задач для плоских и трехмерных упругих тел. Единственным численным примером статьи является задача об изгибе тонкого стержня, находящегося над препятствием. Эта весьма простая задача решалась посредством дискретизации с 7-ю расчетными узлами, не позволяющей говорить о какой-либо адекватности дискретной модели инженерной задаче.

Настоящая заметка содержит пункты 1–6. В п. 1 описан предлагаемый в статье [10] метод, в п. 2 показывается его несостоятельность, в остальных пунктах обсуждаются быстродействие алгоритма, численный пример и дается краткое сравнение с другими исследованиями.

1. Предлагаемый авторами «метод». Рассматривается трехмерное упругое тело, закрепленное на части границы, расположенное над жестким препятствием, которое может достигаться в процессе деформации. В предполагаемой зоне контакта выбирают² «систему узлов $CN = \{cn_1, cn_2, \dots, cn_n\}$, в которых будет производиться расчет смещений» $U = (u_{1x}, u_{1y}, u_{1z}, u_{2x}, u_{2y}, u_{2z}, \dots, u_{nx}, u_{ny}, u_{nz})^T$ под действием приложенных в узлах сил $P = (p_{1x}, p_{1y}, p_{1z}, p_{2x}, p_{2y}, p_{2z}, \dots, p_{nx}, p_{ny}, p_{nz})^T$. При отсутствии препятствия «силы P и смещения U связаны формулой

$$KU = P, \quad (1)$$

где K — матрица жесткости системы.» «В нашем случае она вычисляется следующим образом.

² Если не отмечается другое, используются обозначения авторов. Номера заимствованных формул соответствуют номерам статьи.

В первом узле по оси X прикладывается сила $1H$. Рассчитываются перемещения всех расчетных узлов в трех направлениях X, Y, Z — (например, это можно сделать с помощью конечно-элементных кодов ANSYS, NASTRAN и др.) Полученный вектор перемещений становится первой строкой матрицы податливости R .

Так же вычисляют все строки матрицы R (на сетке, не зависящей (!) от сетки расчетных узлов CN), полагая $K = R^{-1}$. Контактная задача формулируется как задача о минимуме потенциальной энергии

$$W(U) = \frac{1}{2} U^T K U - P^T U$$

при линейных ограничениях

$$AU \leq \Delta, \quad (4)$$

«где A — матрица, задающая направление; Δ — вектор, определяющий расстояние от расчетных узлов до препятствия в данном направлении.»

Авторы добавляют:

«Следует отметить, что матрица $K = R^{-1}$ не является матрицей жесткости какой-либо конечно-элементной модели.» «Матрица жесткости характеризует способность тел реагировать на приложенную извне нагрузку. Она определяется геометрией тела, прочностными свойствами материалов, из которых оно изготовлено, а также расположением расчетных узлов. Следовательно, изменение любого из этих параметров требует повторного определения матрицы жесткости.»

К сожалению, эти глубокие заключения не имеют под собой почвы: именно такой матрицы $K = R^{-1}$ для тел, рассматриваемых в рамках плоской или трехмерной теории упругости, просто не существует.

2. Несостоятельность предложенного метода.

2.1. Решение контактных задач для упругих тел размерности $m = 2, 3$ изложенным в статье методом невозможно. В соответствии с уравнениями линейной теории упругости в точке приложения сосредоточенной силы при $m = 2, 3$ перемещения имеют особенность, т. е. обращаются в бесконечность. Этот факт, излагаемый студентам ИСФ на 3-м курсе, видимо, не известен авторам статьи, специализирующимся по прикладной математике. Напомним решение Буссинеска (1885) о силе, приложенной к упругому полупространству. Для краткости приведем только формулу вертикальных (в направлении оси z) перемещений точек плоскости $z = 0$:

$$w(x, y, z)|_{z=0} = \frac{1-\nu^2}{\pi E r} P,$$

где P — величина силы, приложенной в начале координат по оси z ; E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона и r — расстояние от точки (x, y, z) до точки приложения силы (см. полные формулы для перемещений и напряжений в [1, с. 45]). В точке приложения силы имеется особенность порядка r^{-1} , а в плоском случае — особенность типа $\log r^{-1}$ [1]. Такие же по порядку особенности имеют место и для m -мерных тел конечных размеров при $m = 2, 3$. Поэтому и для них соотношения (1), связывающие перемещения точек с приложенными к ним силами посредством матрицы $K = R^{-1}$ не имеют смысла, не могут быть найдены и, в частности, вычислены. О какой матрице податливости R , с описания которой начинается изложение алгоритма в статье, можно говорить, если ее диагональные коэффициенты и примерно n других коэффициентов обращаются в бесконечность?!

Авторы, однако, пишут, что строки матрицы R приближенно могут быть вычислены, «например, ... с помощью конечно-элементных кодов ANSYS, NASTRAN и др.» Да, некие строки коэффициентов могут быть вычислены, поскольку континуальная задача в расчете заменяется дискретной, но они будут существенно зависеть от применяемых сеток. При сгущении сеток диагональные и некоторые другие элементы этих строк будут стремиться к бесконечности.

Неопределенность матрицы R вытекает не только из достижений теории упругости XIX века, но и из результатов функционального анализа, курс которого читается в СПбГПУ одним из авторов статьи. Известны теоремы вложения С.Л. Соболева для функциональных пространств [25,19], согласно которым пространство $H^1(\Omega) = W_2^1(\Omega)$ функций, имеющих интегрируемые с квадратом первые производные, не вложено в пространство непрерывных функций $C(\Omega)$, если $m \geq 2$. Отсюда, в свою очередь, следует, что для двумерных и трехмерных линейно упругих тел вектор-функции перемещений с конечной энергией деформации (например, при $E = \text{const}$ и $\nu < 0,5$) не являются, вообще говоря, непрерывными. Этот факт, азбучный для современного функционального анализа, тоже приводит к заключению о бессмысленности матрицы R .



2.2. Уже первое предложение в описании метода решения на с. 147 — «Рассмотрим упругое тело, закрепленное в нескольких точках» — некорректно: такая задача линейной теории упругости не имеет решения. На самом деле, трехмерное тело (в соответствии с уравнениями линейной теории упругости) нельзя закрепить в точке или в нескольких дискретных точках. Некорректность постановки таких краевых условий объясняется теми же факторами, которые рассмотрены в п. 2.1.

2.3. О том, как указанная в статье схема вычисления некорректной матрицы влияния была реализована на компьютере, в [10] не дается никаких пояснений, кроме ссылки на ANSYS. Среди обширных возможностей ANSYS'а выбор нужных определяет пользователь. Если применять специальные методы решения задач с особенностями (то есть позволяющие приблизиться даже и к таким решениям), то сразу становится ясной бессмысленность подобных вычислений и предлагаемого метода. Если же «не ловить» особенности и, например, применять квазиоднородные сетки, то к несостоятельности метода добавляется его непоследовательная реализация.

3. О быстродействии алгоритма учета нелинейности. Причины, по которым предлагаемый «метод» (забудем на время, что он неверный) именуется в статье быстрым, невозможно понять. Как может быть быстрым алгоритм решения задачи (в правильной постановке она корректна и имеет относительно простой тип нелинейности), оперирующий с матрицей, для вычисления которой нужно решить $m \times n$ задач с особенностями? Причем решить, как предлагается, посредством отнюдь не быстрого ANSYS'а. Обычно вывод о быстродействии (литература по этой теме огромна) делается путем сравнения с алгоритмами других авторов, графиков зависимости времени вычислений от числа неизвестных дискретной задачи или путем априорных оценок числа арифметических операций и т. д. Анализ быстродействия алгоритмов решения контактных задач (теоретический и посредством численных экспериментов) можно найти, например в [7, 8, 15, 17, 21–24, 27, 28]. Ничего подобного в статье [10] нет. Да таких графиков и не могло быть, если решена одна задача с 7-ю неизвестными. В целом наиболее важные высказывания, относящиеся непосредственно к вычислениям, представляют собой недомолвки и неточности. Приведем примеры.

Как отмечалось, о быстродействии алгоритма написано лишь два предложения. Смысл их в том, что подход авторов основан на «использовании минимизации квадратичного функционала с линейными ограничениями» и «благодаря этому подходу достигается высокая скорость вычислений.» В связи с этим возникает много вопросов, на которые не дается ответов.

Методов минимизации указанных функционалов много, если не сказать — очень много. Можно предположить, что имеется в виду один из методов нелинейного программирования и оптимизации. Но таких методов тоже много, о чем можно судить, например, по посвященным им книгам [5, 9], выпущенным недавно. Важно и другое: эти методы не относятся ни к новым, ни к быстродействующим. Они нередко применялись при решении контактных задач для линейно упругих тел в рамках МКЭ, но оказались медленно сходящимися (см. по этому поводу, например, статью Sanders [22] (2006), книги Laursen [16] (2003) и Wriggers [29] (2006), сборник [4] (2007), посвященные непосредственно численному решению контактных задач³. Для решения таких задач появилось несколько существенно более быстрых и, в частности, оптимальных по вычислительной работе методов. Например, МММ — монотонный многосеточный метод (см. Wohlmuth & Krause [28], Krause & Sander [14], Kornhuber et al. [13]), методы Schoberl'я [23, 24] и Лапина и Игнатъевой [15, 8], опирающиеся на МДО (метод декомпозиции области⁴). Описание методов работ [28, 23] и их сравнение на ряде численных примеров, включающих сложной формы хвостовик лопатки турбины, можно найти также у Сальгадо [21].

Чаше оптимизационные методы используют для минимизации функционалов с несколькими локальными минимумами, когда круг методов, позволяющих в принципе решать такие задачи, сужается. Среди них наибольшее признание получил метод SQP — последовательного квадратичного программирования. В классе контактных задач функционалы указанного

³ В лучшем случае методы нелинейного программирования приближаются по скорости сходимости к методу Ньютона (см., напр., Sander [22, с. 6]).

⁴ См. обзор работ по МДО Корнеева и Лангера [12] и библиографию в нем.

типа возникают, например, в случае контакта нелинейно упругих тел. И в этом случае проявляется недостаток оптимизационных методов — медленная сходимость. Недавно Sander [22] предложил эффективный симбиоз SQP и МММ для численного решения контактных задач с геометрически и физически (гиперупругие материалы) нелинейно упругих телами при больших деформациях. В нем учет нелинейностей двух типов (в результате контакта и нелинейности уравнений самих тел) удачно распределен между двумя методами, что существенно ускорило сходимость. Представленные в статье результаты решения нескольких трехмерных контактных задач свидетельствуют о том, что алгоритм — быстрый и имеет сложность, аналогичную сложности многосеточного метода для линейных задач.

4. Численный пример. Численный пример, данный в статье [10], вызывает сомнения как с механической, так и с вычислительной точек зрения, тем более, что он не служит подтверждением основных положений статьи (о способе формирования дискретной задачи и быстродействии алгоритма). Задача в численном эксперименте слишком проста, чтобы отражать вычислительные трудности решения контактных задач, представляющих интерес для техники. Численно моделируется напряженное состояние тонкого круглого стержня, прижимаемого к препятствию в нескольких точках. По ряду признаков можно заключить, что стержень моделируется в рамках теории изгиба тонких стержней (в частности, соответствующий пункт статьи назван: «Изгиб упругого стержня при наличии препятствия (задача 2)»). Очевидна неадекватность

в общем случае такой модели и механической задачи, в которой трехмерность напряженного состояния в окрестностях прижимания стержня к препятствию может играть основную роль, особенно если учесть характер исходной технической задачи. Как можно судить из предыдущей публикации [20] этих авторов, речь идет о преднапряженных клепочных/болтовых соединениях, применяемых в самолетостроении.

Существенно более сложную задачу такого типа находим у Champaneu et al. [3]. В [3] рассматриваются три тонких листа (рис. 1), соединенные титановыми болтами. Средний лист из углеродного композита закреплен по одной из граней, к двум другим алюминиевым листам приложены продольные силы. Нужно найти оптимальную (с точки зрения уменьшения напряжений в конструкции) комбинацию преднапряжений болтовых соединений и степени шероховатости соприкасающихся поверхностей, характеризуемых тремя коэффициентами трения f_k , $k = 1, 2, 3$. Для решения линейных задач, возникающих на каждой итерации решения контактных задач с трением, применялся метод типа метода подструктур, своего рода вариант МДО (см. [12]). На рис. 2 показаны различные подструктуры и сетка конечных элементов-тетраэдров (плохо видна из-за ее густоты) с 75736 степенями свободы. Сравнивались, например, 625 вариантов преднапряжений болтов при 125 комбинациях коэффициентов трения. Авторы предложили специальный метод перебора и расчета вариантов, который при затратах 32 мин времени ЭВМ на отдельный расчет позволил получить 625 решений нелинейных контактных задач с трением за 15 часов — см. [3, табл. 4 и 5].

В [3] представлены также результаты расчетов болтовых соединений трехмерных тел существенно более сложного очертания.

Добавим несколько слов о вычислительной стороне алгоритма [10].

Предположим, алгоритм стартует, как обычно делается, с формирования матрицы жесткости K размерности $2n \times 2n$, а не матрицы податливости $R = K^{-1}$. Явный вид матрицы K можно найти в любом учебнике по строительной механике: в каждой ее строке содержится не более 6-ти ненулевых коэффициентов, и решение СЛАУ с такой матрицей требует не более cn а.о. (арифметических операций), c — абсолютная постоянная.

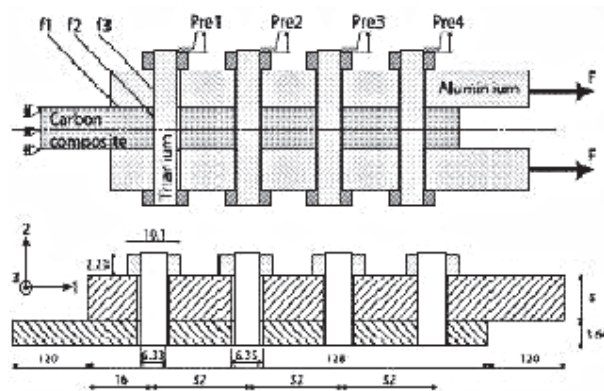


Рис. 1. Схема соединения трех тонких листов титановыми болтами



В то же время матрица R вся заполнена, и ее вычисление с помощью ANSYS, как и умножение вектора на нее, будет стоить не менее cn^2 а.о. Таким образом, при одинаковом методе удовлетворения условиям непроникновения вычисления по алгоритму авторов будут в n раз медленнее стандартного алгоритма. И для тел большей размерности алгоритм авторов не только не приближается к быстрым, но ухудшает быстродействие обычных распространенных алгоритмов МКЭ.

Авторы не принимают во внимание некоторые аксиомы организации вычислений. Например, хранение информации в неявном/упакованном виде (матрица K), а не в явном/развернутом (матрица R) часто повышает быстродействие. Неясно также, зачем в алгоритме численного примера нужен ANSYS (см. начало с. 150)? Распространенная схема МКЭ (она же — схема строительной механики) для задач изгиба — растяжения тонких стержней относится к классу точных (см. Корнеев [11]⁵). В частности, точна схема с 7-ю расчетными узлами, и дополнительное сгущение сетки при расчете соответствующей матрицы влияния не приводит к ее уточнению.

5. О современных исследованиях по численному решению контактных задач. Контактные задачи весьма распространены в инженерной практике, включая области самых высоких технологий. В современной технике силы прикладываются к твердым телам чаще всего посредством других твердых тел, что приводит к необходимости исследования и оптимизации зон контакта [17,18]. Несколько последних десятилетий эти задачи были в центре внимания вычислительной математики и математического моделирования мирового научного сообщества, был сделан ряд радикальных продвижений, особенно в области ускорения численных методов. О размахе научной атаки позволяет судить обзор работ по контактным задачам Бураго и Кукуджанова [2, 2005 г.] в журнале «Известия РАН. Механика твердого тела». Список публикаций содержит 635 единиц, при этом многие важные работы зарубежных и отечественных авторов остались за его рамками.

⁵ Понятие точной разностной схемы введено А. Н. Тихоновым и А.А. Самарским, см.: Об однородных разностных схемах высокого порядка точности на неравномерных сетках. — Журн. вычисл. матем. и матем. физ. — 1963. Т. 3, № 1; ссылки на более ранние работы.



Рис. 2. Схема подструктур и расчетная сетка конечных элементов

В [10] не обнаруживается интереса написавших статью ученых к мировым достижениям в области решения контактных задач. В списке литературы находим книгу А.И. Лурье (1970) по теории упругости и тезисы доклада тех же авторов на студенческой конференции. В «методе» решения статьи [10] не использован ни один из быстрых алгоритмов, появившихся за последние полвека. В то же время в работах других авторов, включая цитировавшиеся выше, можно найти многие численные решения сложных, как правило, трехмерных, контактных задач, полученные эффективными, в том числе линейной сложности методами, вместе с обстоятельным анализом их быстродействия. За отсутствием места остановимся кратко только на МММ — монотонном многосеточном методе, уже упоминавшемся в п. 3.

МММ — один из наиболее быстродействующих современных алгоритмов решения контактных задач, хорошо изученный теоретически и широко применяемый для решения сложных задач [27, 28, 14, 7, 6, 13]. Wohlmuth и Krause [28] приводят решение задачи о линейно упругом бруске между двумя линейно упругими цилиндрами. Для ее решения применялся МММ с числом уровней, достигавшим 9, адаптивными сетками и выходом по достижении $\varepsilon_{\text{TOT}} = 10^{-7}$ величины энергетической нормы разности решений на двух последовательных МММ итерациях. Адаптация сеток приводила к существенно неравномерным результирующим расчетным сеткам, значительно уменьшающим размерности дискретных задач. В одном из расчетов вместо 10 485 760 конечных элементов квазиоднородной сетки, необходимых для достижения $\varepsilon_{\text{TOT}} = 10^{-4}$ потребовалось всего 207 561 конечных элементов адаптивной сетки (см. [27, с. 14]), что в 50 раз меньше. МММ для контактной задачи сравнивался (см. [28, табл. 5.1 и 5.2]) с классическим многосеточным методом для соответствующих задач линейной теории упругости, относящимся, как известно, к оптимальным по вычислительной работе, т. е. быстрым. Сравнение подтвердило, что МММ для контактных задач также является быстрым методом.

В работах R. Krause и B. Wohlmuth и их коллег описаны результаты численного решения многих других задач. Например, в [6] среди прочих можно найти контактную задачу о взаимодействии двух поясничных позвонков с имплантированным искусственным позвоночным диском между ними. Учитывались условия, моделирующие приклепку имплантата к позвонкам. В [13, 14] приведено численное решение динамической задачи о контакте бедра и берцовой костей в коленном суставе.

Подведем итоги. В [10] представлен метод, непригодный для решения контактных задач

для двумерных и трехмерных упругих тел. Никакого отношения к быстродействующим численным методам он не имеет. В целом статья представляет собой собрание ошибок, неточностей и умолчаний, свидетельствующих о недостаточной квалификации в области численных методов решения уравнений в частных производных. Она дезориентирует читателя в весьма важной области методов численного решения контактных задач.

Исследование, изложенное в статье, поддержано грантом РФФИ № 08-01-00676-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прочность, устойчивость, колебания [Текст]: справочник, Т. 1. / Под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко.— М.: Машиностроение, 1968.— 831 с.
2. **Бурого, Н.Г.** Обзор контактных алгоритмов [Текст] / Н.Г. Бурого, В.Н. Кукуджанов // МТТ.— 2005.— № 1.— С. 45–87.
3. **Champaney, L.** Adaptive multi-analysis strategy for contact problems with friction [Текст] / L. Champaney, P.-A. Boucard, S. Guinard // Comput. Mech.— 2008.— Vol. 42.— P. 305–315.
4. Computational Contact Mechanics Series [Текст] / Eds. P. Wriggers, T.A. Laursen CISM International Centre for Mechanical Sciences.— 2007.— VII, № 498.— 248 p. ISBN: 978-3-211-77297-3.
5. **Conn, A.R.** Trust-region methods [Текст] / A.R. Conn, N.I. M. Gould, P.L. Toint; Society for Industrial and Applied Mathematics.— Philadelphia, PA, USA, 2000.— ISBN 0-89871-460-5.
6. **Dickopf, Th.** Efficient Simulation of Multi-Body Contact Problems on Complex Geometries: A Flexible Decomposition Approach Using Constrained Minimization [Текст] / Th. Dickopf, R. Krause; University of Bonn, Institute of applied mathematics. Preprint № 388.— Bonn, 2008.— [Электронный ресурс]: <http://www.sfb611.iam.uni-bonn.de/>
7. **Eberhard, P.** Multilevel numerical algorithms and Experiments for contact dynamics [Текст] / P. Eberhard, S. Hueber, Y. Jiang [и др.] // Multifield problems in solid and fluid mechanics Lecture notes in applied and computational mechanics / Eds. R. Helmig, A. Mielke, B. Wohlmuth.— 2006.— Vol. 28.— P. 272–319.
8. **Игнатъева, М.А.** Метод декомпозиции области для задачи Синьорини в смешанной гибридной формулировке [Текст] / М.А. Игнатъева, А.В. Лапин, Н.В. Лапин // Ученые зап. Казан. гос. ун-та.— 2006.— Т. 148, № 3.— P. 80–93.
9. **Jarre, F.** Optimierung [Текст] / F. Jarre, J. Stoer.— Springer, 2004.— ISBN 3-540-43575-1.
10. **Ковтун, М.В.** Быстрый алгоритм решения некоторых контактных задач механики [Текст] / М.В. Ковтун, О.П. Родионова, С.В. Лупуляк // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 1, 2009. № 1.— С. 146–151.
11. **Корнеев, В.Г.** О точных сеточных методах [Текст] / В.Г. Корнеев // Журнал выч. матем. и матем. физ.— 1982.— Том 22. № 3.— С. 646–654.
12. **Korneev, V.** Domain Decomposition Methods and Preconditioning [Текст] / V. Korneev, U. Langer.— Encyclopedia of Computational Mechanics, Vol. 1. / Eds. E. Stein, R. de Borst, Th.J.R. Huges John Wiley & Sons, Ltd.— 2004.— P. 617–647.
13. **Kornhuber, R.** A Monotone Multigrid Solver for Two Body Contact Problems in Biomechanics [Текст] / R. Kornhuber, R. Krause, O. Sander [и др.] // Comp. Vis. Sci.— 2008.— № 1.— P. 3–15.
14. **Krause, R.** Fast solving of contact problems on complicated geometries [Текст] / R. Krause, O. Sander // Domain Decomposition Methods in Science and Engineering / Eds. R. Kornhuber et al.— Springer Verlag, 2005.— P. 495–502.
15. **Лапин, А.В.** Решение задачи о препятствии методом декомпозиции области [Текст] / А.В. Лапин, М.А. Игнатъева // Ученые зап. Казан. гос. ун-та.— 2005.— Т. 147. № 3.— P. 112–126.
16. **Laursen, T.A.** Computational Contact and Impact Mechanics— Fundamentals of Modeling Interfacial Phenomena in Nonlinear Finite Element Analysis [Текст] / T.A. Laursen.— Springer, 2003.— XVI+454 p.— ISBN: 978-3-540-42906-7.
17. **Li, W.** Shape Design For Elastic Contact Problems by Evolutionary Structural Optimisation [Текст] / W. Li, G.P. Steven, Y.M. Xie // SORGA Structural Optimisation Notes.— Department of Aeronautical Engineering University of Sydney, Australia.— September 1998. № 5.
18. **Li, W.** An evolutionary shape optimization for elastic contact problems subject to multiple load cases [Текст] / W. Li, Q. Li, G.P. Steven [и др.] // Comput. Methods Appl. Mech. Energ.— 2005.— Т. 194.— P. 3394–3415.



19. **Никольский, С.М.** Приближение функций многих переменных и теоремы вложения [Текст] / С.М. Никольский.— М.: Наука, 1969.

20. **Родионова, О.П.** Моделирование процесса клепочного соединения фюзеляжа самолета [Текст] / О.П. Родионова, М.В. Ковтун, С.В. Лупуляк // XXXVII неделя науки СПбГПУ. Ч. V: Матер. Всеросс. научн. конф. студентов и аспирантов, СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008.

21. **Salgado, A.** Numerical solution of the contact problem for a turbine blade butt [Текст] / A. Salgado // Быстрые сеточные методы вычислительной механики сплошной среды / Под ред. В.Г. Корнеева; НИИ химии Санкт-Петербургского гос. университета.— СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007.— С. 33–57.

22. **Sander, O.** A Fast Solver for Finite Deformation Contact [Текст] / O. Sander; DFG research center Matheon. Preprint № 319.— 2006.— [Электронный ресурс]: http://page.mi.fu-berlin.de/sander/publications/matheon_319.pdf

23. **Schoberl, J.** Solving the Signorini problem on the basis of domain decomposition technique [Текст] / J. Schoberl // Computing. 1998.— Т. 60. № 4.— С. 323–344.

24. **Schoberl, J.** Efficient contact solvers based on domain decomposition techniques [Текст] / J. Schoberl // Computers and mathematics with applications.— 2001.— Т. 42.— Р. 1217–1228.

25. **Соболев, С.Л.** Некоторые применения функционального анализа в математической физике [Текст] / С.Л. Соболев.— Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1962.

26. **Solodov, M.V.** Global convergence of an SQP method without boundedness assumptions on any of the iterative sequences [Текст] / M.V. Solodov // Math. Program.: Ser. A.— 2009.— Т. 118. Р. 1–12.

27. **Wohlmuth, B.** A Dirichlet-Neumann type algorithm for contact problems with friction [Текст] / B. Wohlmuth, R. Krause // Computing visualization science.— 2002.— Т. 5, № 1.— Р. 139–148.

28. **Wohlmuth, B.** Monotone methods on non-matching grids for non-linear contact problems [Текст] / B. Wohlmuth, R. Krause // SIAM Journal of Scientific Computing, 2003.— Т. 25.— Р. 324–347.

29. **Wriggers, P.** Computational Contact Mechanics [Текст] / P. Wriggers.— Springer, 2006.— XII.— 518 p.— ISBN: 978-3-540-32608-3.

И.А. Брюханова, Е.В. Дементьева

ПАМЯТИ Л.Н. ТОЛСТОГО

Исполнилось 100 лет со дня смерти Льва Николаевича Толстого. Кончина великого писателя явилась событием такого широкого общественного звучания, какого история русской культуры до того времени не знала.

Жизнь его, особенно в последние годы, до сих пор хранит много тайн. Немало загадок оставили и события, связанные с его именем, происшедшие после смерти «великого старца». Некоторые из них имеют отношение к истории нашего вуза и непосредственно — Фундаментальной библиотеки.

8 ноября 1910 года в Санкт-Петербургском политехническом институте в связи с известием о смерти Л.Н. Толстого состоялось экстренное заседание Совета, «...постановившего в день погребения его отменить учебные занятия и устроить торжественное заседание Совета в Актовом зале института, а в библиотеке института поставить бюст покойного.

Все постановления Совета института были выполнены: 10 ноября в Актовом зале состоялось «первое и последнее публичное заседание Совета, на котором был произнесен ряд речей, посвященных Л.Н. Толстому; а в библиотеке института в мае 1911 года была поставлена по предложению председателя библиотечной комиссии Б.Н. Меншуткина статуя Л.Н. Толстого работы известного скульптора И.Я. Гинцбурга*» [1].

Скульптура была приобретена (за 450 руб.) на средства членов Совета и установлена в по-

мещении библиотеки, предположительно, в 1912 году.

Первые подробные сведения об этом скульптурном портрете Л.Н. Толстого, как и упоминание о нахождении его в Политехническом институте, содержатся в описании экспозиции Толстовского музея в Санкт-Петербурге: «...В середине комнаты стоит массивная статуя работы И.Я. Гинцбурга. Художник изобразил Л.Н. сидящим в кресле; в руках — открытая книга, он оторвался от чтения; ноги покрыты пледом, как часто бывало в последние годы жизни Л.Н., когда он чувствовал недомогание. Работа эта относится к концу 1910 г. Имея в своей основе эскиз 1907 года, она является тем не менее как бы синтезом всех работ Гинцбурга над Толстым — (высота 166, ширина 114, длина 149 см.). Другой экземпляр ее находится в Петербурге, в зале Политехнического института» [2].

На фотографиях и почтовых открытках того времени видно, что одна из упомянутых скульптур — Л.Н. Толстой, сидящий в кресле с книгой в руках, — была установлена в центре зала между двух колонн, органично вписавшись в интерьер библиотеки.

Она выполнена из тонированного (бронзирования) гипса, общая с деревянным постаментом высота — 285 см.; на боковой стенке кресла, в котором сидит Толстой, лаконичная надпись-автограф: «И. Гинцбург, 1911 г.».

Интересно, что один из скульптурных портретов Л.Н. Толстого, созданных И. Гинцбургом, был представлен на всемирной выставке в Риме и на весенней выставке 1912 года в залах Императорской академии художеств в Петербурге.

К сожалению, не обнаружено сведений о том, как в 1912 году было обставлено появление и открытие памятника Л.Н. Толстому в институте.

Не сохранилось сведений (кроме нескольких фотографий) и об устройстве в Фундаменталь-

* Илья Яковлевич Гинцбург (1859–1939), известный скульптор, академик Академии художеств, автор целой галереи малых скульптурных форм — жанровых сцен, бюстов и статуэток писателей, художников, композиторов, а также ряда монументальных произведений: скульптур, памятников-надгробий. Он неоднократно бывал и работал в доме Льва Толстого, создав как небольшие, так и крупномасштабные скульптурные портреты писателя.



Фото из «Альбома видов С.-Петербургского политехнического института»
Библиотека (фото 1912–1913 гг.)



Читальный зал библиотеки С.-Петербургского политехнического института
(фото из книги: Кириченко Е.И. Русская архитектура 1830–1910-х годов. — М., 1984)



Читальный зал Фундаментальной библиотеки (фото 1928 г.)

ной библиотеке в 1928 году (возможно, в 1929–1930 гг.) грандиозной «Толстовской выставки», посвященной 100-летию со дня рождения великого писателя. На ней были представлены уникальные экспонаты, хранящиеся сегодня в Литературном музее Пушкинского дома и в музее Л. Н. Толстого в Москве.

Скульптура Льва Николаевича Толстого и сегодня служит украшением читального зала Фундаментальной библиотеки Санкт-Петербургского политехнического университета. Она принадлежит к числу ценных художественно-документальных

памятников искусства начала XX века. Как предмет декоративно-прикладного искусства, живописи и скульптуры она является объектом культурного наследия федерального значения и находится под охраной государства.

В фондах библиотеки Политехнического университета хранятся прижизненные издания сочинений Л. Н. Толстого, воспоминания о нем современников, репринтные и оригинальные юбилейные, иллюстративные издания, дневники и опубликованная переписка, отзывы о его работах, критические статьи и др. материалы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меншуткин, Б.Н. История Санкт-Петербургского политехнического института с его основания до Октябрьской революции (1899–1917) [Текст] / Б.Н. Меншуткин // НТВ СПбГТУ. — 2001. № 4. — С. 190.

2. Толстовский музей в С.-Петербурге: 1. Описание музея [Текст] / Сост. В.И. Срезневский и В.Н. Тукалевский. — СПб. : Фототип. и Тип. А.Ф. Дресслера, 1912 (7 нояб.). — 192 с. : ил.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ

АКСЕНОВ Андрей Владимирович — кандидат технических наук доцент кафедры СР НГО Института транспорта Тюменского государственного нефтегазового университета

(3452)-41-70-25,
sunshine_83@inbox.ru

АКУЛОВ Артем Юрьевич — старший преподаватель кафедры пожарной безопасности в строительстве Уральского института государственной пожарной службы МЧС России

620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22
(343)-360-80-56,
Akulov-07@mail.ru

АЛЕШИНА Алена Сергеевна — аспирант кафедры промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 9/2
(812) 297-49-90
as_aleshina@mail.ru

АНДРЕЕВ Константин Дмитриевич — кандидат технических наук доцент кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(812) 552-65-66
visantiya@freemail.ru

АНДРЕЕВ Михаил Александрович — доцент кафедры управляющих и вычислительных систем Вологодского государственного технического университета

160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15
(8712) 72-14-11 доб. 1-82
m.andreev.vogtu@gmail.com

АНДРУЩУК Виктор Васильевич — кандидат технических наук доцент кафедры теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(812) 552-75-72

АРЕФЬЕВ Николай Викторович — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой водохозяйственного и ландшафтного строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(812)535-46-10
arefiev@venture.spb.ru

АСФОНДИЯРОВА Ирина Владимировна — кандидат технических наук доцент кафедры экспертизы потребительских товаров Санкт-Петербургского торгово-экономического института.

194021, Санкт-Петербург, Новороссийская ул., 50
(812)297-82-57

АТОЯН Грант Левонович — аспирант кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(812)294-22-62

АФАНАСЬЕВА Ирина Борисовна — старший преподаватель кафедры инженерной педагогики и психологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(812)552-66-22

БАДЕНКО Владимир Львович — доктор технических наук профессор кафедры водохозяйственного и ландшафтного строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(812)535-46-10

БАРАКОВСКИХ Сергей Александрович — старший преподаватель кафедры пожарной тактики и службы Уральского института государственной пожарной службы МЧС России

620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22
(343)-360-81-79

БАРАНОВА Ирина Ивановна — доцент кафедры русского языка Института международных образовательных программ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 28

(812) 322-56-32

kaf_rus@imop.spbstu.ru

БАТУХТИН Андрей Геннадьевич — кандидат технических наук директор технопарка Читинского государственного университета

672039, г. Чита, ул. Александровская, 30

(3022) 41-70-85

БАХМАТОВА Ксения Арнольдовна — кандидат сельскохозяйственных наук старший преподаватель кафедры биогеографии и охраны природы факультета географии и геоэкологии Санкт-Петербургского государственного университета

199187, С-Петербург, 10-я линия Васильевского острова, 33-35

(812)450-70-61

БАШКАРЕВ Альберт Яковлевич — доктор технических наук профессор, директор инновационно-инвестиционного комплекса Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29

(812)552- 62- 52

БЕЛОВ Юрий Михайлович — кандидат технических наук ведущий специалист ЗАО «Электродный завод»

194100, г. Санкт-Петербург, ул. Литовская, 12

(821)295-06-76

БОРИСЕВИЧ Алексей Валерьевич — кандидат технических наук ассистент кафедры автоматов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29

(812)552-96-86

БОРОВКОВ Валерий Михайлович — доктор технических наук профессор кафедры промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29

(812) 297-48-28

vm_borovkov@mail.ru

БРЮХАНОВА Ирина Анатольевна — заведующая отделом краеведческой библиографии фундаментальной библиотеки Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29

(812) 552-25-59

irina@unilib.neva.ru

ВАЛДАЙЦЕВА Екатерина Александровна — старший преподаватель кафедры сварки и лазерных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29

(812) 552-98-43

ВАН Сынань — магистр кафедры электрических систем и сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29

(812)552-50-72

ВОДОВОЗОВ Александр Михайлович — кандидат технических наук доцент, заведующий кафедрой управляющих и вычислительных систем Вологодского государственного технического университета

160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15

(8712) 72-14-11 доб. 1-82

ВОЛЬНОВ Илья Николаевич — кандидат технических наук ведущий инженер отдела технической поддержки Русской промышленной компании

101000, г. Москва, Петроверигский переулок, 4

(495)625-90-44

volnov@cad.ru

ГАГАРИН Юрий Иванович — доктор технических наук профессор кафедры распределенных интеллектуальных систем Института международных образовательных программ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 28

(812) 329-47-45

yigagarin@list.ru

ГАЛЁРКИН Юрий Борисович — доктор технических наук профессор кафедры компрессорной, вакуумной и холодильной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

(812) 552-65-86

ГЕДЬКО Павел Юрьевич — аспирант кафедры автоматов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29

(812)552-96-86

choppepper@list.ru

ГОРБОВСКАЯ Алла Даниловна — кандидат географических наук доцент кафедры водохозяйственного и ландшафтного строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29

(812) 535-46-10

ГРАЧЕВ Алексей Андреевич — ассистент кафедры транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29
(812)552-84-01
ptsm@mail.ru

ГРИГОРЬЕВ Константин Анатольевич — кандидат технических наук заведующий кафедрой реакторо- и парогенераторостроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812) 552-67-96
kg1210@mail.ru

ГРЯЗНОВ Николай Анатольевич — кандидат физико-математических наук начальник лаборатории интегральной сенсорики Государственного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики»

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21
(812)-294-47-36
gna@rtc.ru

ГУМЕНЮК Василий Иванович — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(812)294-22-62

ДЕМЕНТЬЕВА Елена Васильевна — директор фундаментальной библиотеки Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812) 552-75-59
demev@unilib.neva.ru

ДОБРЕЦОВ Роман Юрьевич — кандидат технических наук доцент кафедры колесных и гусеничных машины Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(812) 534-14-31
kgm-spb@list.ru

ДОМАКОВ Вячеслав Вениаминович — доктор технических наук, доктор экономических наук профессор кафедры национальной безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(812)294-22-82

ДРОЗДОВ Александр Александрович — студент кафедры компрессорной, вакуумной и холодильной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812) 552-65-86

ДРОКИН Виталий Вадимович — аспирант кафедры приборостроения Южно-Уральского государственного университета

454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 87
(351) 267-90-12

ЖИЛЬЦОВ Александр Павлович — кандидат технических наук, заведующий кафедрой металлургического оборудования Липецкого государственного технического университета

398600, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30

ЗВЕРЕВ Сергей Геннадьевич — кандидат технических наук доцент кафедры электротехники и электротехнологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
(812)-552-76-43
s.zverev@mail.ru

ЗОТОВ Олег Геннадиевич — кандидат технических наук доцент кафедры исследования структуры и свойств материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812)552-89-69

ИВАНОВ Вадим Андреевич — доктор технических наук профессор, заслуженный деятель науки РФ, почетный работник газовой промышленности, почетный работник ТГНГУ заведующий кафедрой СР НГО Института транспорта Тюменского государственного нефтегазового университета

625039, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 72, 2-й учебный корпус
(3452)-41-70-25

ИВАНОВ Владимир Юрьевич — аспирант кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного университета водных коммуникаций

198035 Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
251-01-01
ivanov_seaport@mail.ru

ИВАНОВ Дмитрий Владимирович — кандидат технических наук доцент кафедры электротехники и электротехнологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
(812)-552-76-43
d.ivanov@list.ru

ИВАНОВ Евгений Константинович — ассистент кафедры триботехники Санкт-Петербургского института машиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195197, г. Санкт-Петербург, Полостровский пр., 14
(812) 540-58-37

ИВАНОВА Татьяна Юрьевна — аспирант кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812) 294-22-62
tjoe@yandex.ru

ИВАНЬКОВ Сергей Андреевич — аспирант кафедры транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812)552-67-26
ivankov_sa@mail.ru

КАЛУГИН Алексей Владимирович — старший преподаватель кафедры СДМ Читинского государственного университета

672039, г. Чита, ул. Александровская, 30
(3022) 41-70-85

КИРИЧЕНКО Виктор Валерьевич — кандидат технических наук заместитель директора Государственного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики»

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21
(812)-552-45-21
kvv@rtc.ru

КОКОРИН Валерий Николаевич — кандидат технических наук заведующий кафедрой Ульяновского государственного технического университета.

32027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

КОЛБАСНИКОВ Николай Георгиевич — доктор технических наук профессор, руководитель НИЛ пластометрии, механических свойств и структуры материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812)552-89-52
nikolay.kolbasnikov@gmail.ru.

КОНДРАТЬЕВ Виктор Григорьевич — соискатель кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(812)294-22-62

КОРНЕЕВ Вадим Глебович — доктор физико-математических наук профессор кафедры подземных сооружений, оснований и фундаментов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812) 786-45-98
VadimKorneev@yahoo.com

КОСМАЧ Валерий Федосеевич — доктор физико-математических наук профессор кафедры экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812) 552-75-31

КОЧКАРЕВ Дмитрий Алексеевич — младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела факультета при ГНУ ЦНИИ РТК Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, электроник лаборатории интегральной сенсорики Центрального научно-исследовательского института робототехники и технической кибернетики

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21
(812)- 552-43-90, 8-906-257-55-90
kochdim83@mail.ru

КРЫЛОВ Николай Александрович — доцент кафедры триботехники Санкт-Петербургского института машиностроения

195197, Санкт-Петербург, Полостровский пр., 14
(812)540-58-37

КУБЫШКИН Леонид Иванович — кандидат технических наук профессор кафедры возобновляющихся источников энергии и гидроэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, г.Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812) 552-77-71
kubishkin@cef.spbstu.ru

КУЗНЕЦОВ Михаил Валерьевич — ведущий инженер Российско-германского центра лазерных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, г.Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8А
(812) 297-98-00

ЛАВРИН Валентин Георгиевич — аспирант кафедры машиноведения и деталей машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, г.Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812) 5526429

ЛАТЫШЕВ Николай Константинович — аспирант кафедры водохозяйственного и ландшафтного строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(812)535-46-10

ЛЕВИНА Галина Абрамовна — кандидат технических наук доцент кафедры приборостроения Южно-Уральского государственного университета

454080, г.Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 87
(351) 267-90-12

ЛОПОТА Александр Витальевич — директор и главный конструктор Государственного научного учреждения «Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики»

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21
(812)552-01-10
rtc@rtc.ru

ЛУКАШЕВИЧ Анатолий Анатольевич — кандидат технических наук доцент, докторант кафедры строительной механики и теории упругости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812) 552-60-87
aaluk@bk.ru

ЛУКЬЯНОВ Алексей Александрович — аспирант кафедры пластической обработки металлов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812)552-80-90

МАНЖУЛА Константин Павлович — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812) 5528401
manshula@mail.ru

МАРКЕЛОВА Елена Александровна — аспирант кафедры гидравлики СПбГПУ руководитель диспетчерского отделения регионального управления Заказчика по капитальному строительству Ленинградского военного округа

197101 Санкт-Петербург, ул. Мира, 17
(812) 232-51-32

МАРЦЕНЮК Михаил Андреевич — доктор физико-математических наук профессор, заведующий кафедрой компьютерных систем и телекоммуникаций Пермского государственного университета

614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15
(342)2-39-64-50
mrcn@psu.ru

МАТИНЯН Наталия Никитична — доктор сельскохозяйственных наук заведующая лабораторией географии почв биолого-почвенного факультета и профессор кафедры почвоведения и экологии почв Санкт-Петербургского государственного университета

199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7—9
(812)450-70-61

НАГОРНЫЙ Владимир Степанович — доктор технических наук, Заслуженный деятель науки Российской Федерации профессор кафедры транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(812) 552-60-88
nagorny.vladim@yandex.ru

НОВИКОВ Алексей Игоревич — аспирант кафедры технологии конструкционных материалов и металловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812)552-93-02

НОСОВ Виктор Владимирович — доктор технических наук профессор кафедры машиноведения и деталей машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812) 552-64-29

НУСРАТУЛЛИН Эдуард Марсович — заместитель директора по учебной работе филиала Уфимского государственного авиационного технического университета в г. Нефтекамске

452680, г.Нефтекамск, ул.Социалистическая, 42
(34783) 5-02-47
nusratullinem@rambler.ru

ОСТРОУХОВ Всеволод Викторович — аспирант кафедры систем управления Южно-Уральского государственного университета

454080, г.Челябинск, пр. Ленина, 76
(351) 267-94-54
vsvd@yandex.ru

ПЕТИН Владимир Владимирович — специалист отдела коммерциализации технопарка Читинского государственного университета

672039, г. Чита, ул. Александровская, 30
(3022) 41-70-85
vypetin82@mail.ru

ПЕТРЕНЯ Юрий Кириллович — доктор физико-математических наук профессор, заместитель генерального директора—технический директор ОАО «Силловые машины»

195009, Санкт-Петербург, ул. Ватутина, 3
(812) 346-7037
mail@power-m.ru

ПЕТРОВ Георгий Константинович — кандидат технических наук доцент кафедры электротехники и электротехнологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
(812)-552-78-63
nutze@mail.ru

ПЛОТНИКОВ Семен Александрович — кандидат технических наук доцент кафедры сооружений и ремонта нефтегазовых объектов Института транспорта Тюменского государственного нефтегазового университета

625039, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 72
(3452)41-70-25
sunshine_83@inbox.ru

ПОЛИЩУК Владимир Григорьевич — кандидат технических наук заведующий лабораторией кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(812) 552-65-66
turbo@mebil.stu.neva.ru

ПТИЦЫН Алексей Владимирович — кандидат технических наук доцент кафедры безопасных информационных технологий Национального исследовательского университета «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики»

197101, Санкт-Петербург, пр. Кронверкский, 49
(812) 233-8651

ПТИЦЫНА Лариса Константиновна — доктор технических наук профессор кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(812)297-42-18

РАДКЕВИЧ Михаил Михайлович — доктор технических наук профессор, декан механико-машиностроительного факультета, заведующий кафедрой технологии конструкционных материалов и металловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(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, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(812) 552-65-66
turbo@mebil.stu.neva.ru

РОЗИН Леонид Александрович — доктор физико-математических наук профессор кафедры строительной механики и теории упругости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812) 552-60-87
ezlarh@mail.ru

РОМАНЧЕНКО Ольга Викторовна — кандидат технических наук заведующая кафедрой инженерной геодезии и фотограмметрии Воронежского государственного архитектурно-строительного университета

394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84
(4732)71-50-72
mitis.office@rambler.ru

РУДСКОЙ Андрей Иванович — доктор технических наук профессор, член-корреспондент РАН, проректор по научной работе Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812) 552-67-57
rud@tu.neva.ru

РУСИНОВ Ростислав Викторович — доктор технических наук профессор кафедры колесных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812)534-14-31; (812) 534-49-05
kgm-sp@list.ru

РУТКОВСКИЙ Александр Леонидович — доктор технических наук профессор кафедры теории и автоматизации металлических процессов и печей Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственный технологический университет)

362021, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44
(8672) 407 доб. 345

САЙКОВА Мария Сергеевна — инженер-конструктор отдела прочности и ресурса энергооборудования ОАО «НПО ЦКТИ им. Ползунова»

620144 Санкт-Петербург, ул. Атаманская, д.3/6,
(812) 578-88-76
sms@math.spbu.ru

САФРОНОВ Павел Григорьевич — аспирант кафедры тепловых электрических станций Читинского государственного университета

672039, г. Чита, ул. Александровская, 30
(3022) 41-70-85

СВЕТОЗАРСКАЯ Светлана Владимировна — аспирант кафедры возобновляющихся источников энергии и гидроэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812) 552-77-71
svetozarskaya@mail.ru

СЕРГЕЕВ Виталий Владимирович — доктор технических наук профессор кафедры промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 9/2,
(812) 297-49-90

СИВКОВ Владимир Григорьевич — заместитель декана физического факультета Пермского государственного университета

614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15
(342) 2-396-515
sivkov@psu.ru

СИКОЕВ Заур Хетагович — аспирант кафедры экспертизы потребительских товаров Санкт-Петербургского торгово-экономического института

194021, Санкт-Петербург, Новороссийская ул., 50
(812)297-82-57
cukosh@rambler.ru

СКЛЯРЕНКО Максим Сергеевич — кандидат технических наук электроник кафедры компьютерных систем и телекоммуникаций Пермского государственного университета

614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15
(342)2-39-64-50
maxskl@mail.ru

СКОТНИКОВА Маргарита Александровна — доктор технических наук заведующая кафедрой триботехники Санкт-Петербургского института машиностроения

195197, Санкт-Петербург, Полостровский пр., 14,
(812)540-58-37

СКУЛКИН Сергей Валерьевич — аспирант кафедры промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812) 297-48-28
serg3ey@rambler.ru

СМИРНОВ Аркадий Борисович — доктор технических наук профессор кафедры автоматов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812)552-96-86

СМИРНОВА Екатерина Александровна — аспирант кафедры электротехники и электротехнологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812) 552-76-43
ekatherins@gmail.com

СОКОЛОВ Виталий Игоревич — аспирант кафедры информатики Института международных образовательных программ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 28
(812) 534-13-85

СОКОЛОВ Сергей Алексеевич — доктор технических наук профессор кафедры транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29
(812)552-84-01
ptsm@mail.ru

СОКОЛОВ Николай Павлович — кандидат технических наук старший научный сотрудник кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(812) 552-65-66
turbo@mebil.stu.neva.ru

СОЛДАТОВА Кристина Валерьевна — кандидат технических наук доцент кафедры компрессорной, вакуумной и холодильной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29.
(812) 552-65-86
buck02@list.ru

СОЛОВЕЙ Кирилл Сергеевич — аспирант кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.
(812)294-22-62

СОМОНОВ Владислав Валерьевич — ведущий инженер Российско-германского центра лазерных технологий Санкт-петербургского государственного политехнического университета

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8А
(812) 297-98-00

СТРЕЛЕЦ Ксения Игоревна — старший преподаватель кафедры технологии организации и экономики строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812)552-94-60
kstrelets@mail.ru

СЫРОВ Александр Александрович — аспирант кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812)294-22-62

ТЕДЕЕВ Тимур Рутенович — кандидат технических наук старший научный сотрудник лаборатории математических проблем геофизики Южного математического института Владикавказского научного центра РАН

362021г. Владикавказ, ул. Космонавта Николаева, д. 44
trt0013@mail.ru

ТУРИЧИН Глеб Андреевич — доктор технических наук декан факультета технологии и исследования материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
(812) 552-98-43
gleb@ltc.ru

ТУЧКЕВИЧ Евгения Ивановна — доцент кафедры компьютерных интеллектуальных технологий в проектировании, заместитель декана факультета переподготовки специалистов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета по специальности «Дизайн»

195251 Санкт-Петербург, ул. Обручевых, 1
(812) 948 45 13
jane@avalon.ru

УСЫНИН Юрий Семенович — доктор технических наук профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Южно-Уральского государственного университета

454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76
(351) 267-93-21
uus@susu.ac.ru

ФОМИН Дмитрий Юрьевич — аспирант кафедры технологии конструкционных материалов и металловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(812)552-93-20
DmitryFMN@yandex.ru

ФРОЛОВ Владимир Яковлевич — доктор технических наук заведующий кафедрой электротехники и электротехнологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(812) 552-76-43
frolov.eed@gmail.com

ХРАМОВ Алексей Владимирович — аспирант кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(812)294-22-62

ЦВЕТКОВА Галина Викторовна — старший преподаватель кафедры триботехники Санкт-Петербургского института машиностроения

195197, Санкт-Петербург, Полостровский пр., 14,
(812) 540-58-37

ЦИБУЛЬСКИЙ Игорь Александрович — кандидат технических наук доцент кафедры сварки и лазерных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(812) 552-98-43
igor@ltc.ru

ШАКИРОВ Мансур Акмелович — доктор технических наук профессор кафедры теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(812) 552-75-72

ШЕВЧЕНКО Наталья Юрьевна — аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий Камышинского технологического института — филиала ГОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет»

403874 Волгоградская область, г. Камышин, ул. Ленина, 6А
(84457) 9-54-29
LebedevaJulija1@yandex.ru

ШЛЕПЕТИНСКИЙ Антон Юрьевич — аспирант кафедры транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29
(812) 5528401

ЮШИН Борис Альбертович — кандидат технических наук старший научный сотрудник НУТЦ «Электротехнология» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

195251, С-Петербург, Политехническая ул., 29



АННОТАЦИИ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Петреня Ю. К., Сайкова М. С. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ НА ПРОЧНОСТЬ И РЕСУРС ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЭС ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМАХ.

Для определения влияния дефектов типа расслоение на напряженно-деформированное состояние корпусов энергооборудования исследована задача о цилиндрической оболочке с термоизолированными трещинами при нестационарном температурном воздействии. Рассмотрен случай изменения температуры среды с постоянной скоростью и термоудар. Решение задачи получено методом конечных элементов. На основе полученных результатов проанализировано возможное поведение расслоений в процессе эксплуатации.

ТЕПЛОВАЯ СТАНЦИЯ. РАССЛОЕНИЕ. КОЭФФИЦИЕНТ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ. МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. НЕСТАЦИОНАРНОЕ ТЕМПЕРАТУРНОЕ НАГРУЖЕНИЕ. ПРОЧНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ.

Петин В. В., Батухтин А. Г., Калугин А. В., Сафронов П. Г. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ.

Произведена оценка новых технологий использования электрической энергии для повышения расходуемой мощности систем централизованного теплоснабжения и эффективности их функционирования. Предложен новый способ центрального качественного регулирования отпуска теплоты с корректировкой температуры теплоносителя по лучам тепловых сетей, а также совмещения открытых и закрытых схем отпуска теплоты для нужд ГВС.

ТЕПЛОВОЙ НАСОС. ОПТИМИЗАЦИЯ. ЭФФЕКТИВНОСТЬ. СИСТЕМА ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ.

Андреев М. А., Водовозов А. М. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО ПЕРЕХОДНЫМ ПРОЦЕССАМ В СИЛОВОЙ ЦЕПИ.

Рассмотрены теоретические, методологические и практические аспекты идентификации параметров регулируемого асинхронного электропривода на межкоммутационных интервалах силовых ключей автономного инвертора.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ. АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. МЕЖКОММУТАЦИОННЫЙ ИНТЕРВАЛ. ПАРАМЕТР.

Светозарская С. В., Кубышкин Л. И. МЕТОДИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ.

Рассмотрены вопросы автоматизации проектирования объектов возобновляемой энергетики. Предложена методика параметрического моделирования таких объектов. Авторами проанализированы основные особенности параметрического моделирования оборудования и сооружений гидроэнергетических объектов с использованием унифицированных параметрических моделей.

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ. ОБЪЕКТЫ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ. ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ. БИБЛИОТЕКА ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Батухтин А. Г. ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СУТОЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТАНОВОК ГЕЛИОНАГРЕВА НА АБОНЕНТСКИХ ВВОДАХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИИ.

Рассмотрены особенности моделирования работы в течение суток установок гелионагрева на абонентских вводах потребителей тепловой энергии. Предложены метод определения нагрузки ГВС в течение суток, модель суточного изменения потока солнечного излучения, а также установки гелионагрева водопроводной воды и бака аккумулятора.

УСТАНОВКИ ГЕЛИОНАГРЕВА. СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ. СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГИЯ.

Григорьев К. А. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ТОПЛИВА В МЕЛЬНИЦАХ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ.

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований измельчения топлива в лабораторных и промышленных мельницах. Получено экспериментальное подтверждение закона измельчения Риттингера.

ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ. РАЗМОЛ. МЕЛЬНИЦА. ТВЕРДОЕ ТОПЛИВО. ЗАКОН РИТТИНГЕРА.

Шевченко Н. Ю. АНАЛИЗ ПРОГНОЗИРУЕМЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ПРОВОДА РЕКОНСТРУИРУЕМОГО УЧАСТКА ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.

Представлены результаты расчета и анализа ожидаемых механических нагрузок на провода воздушных линий электропередачи для предложенных вариантов реконструкции. Определен оптимальный вариант реконструкции воздушных линий электропередачи, работающих в экстремальных метеословиях.

ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ. ГОЛОЛЕДНО-ВЕТРОВЫЕ НАГРУЗКИ. ВАРИАНТЫ РЕКОНСТРУКЦИИ. ГАБАРИТ ЛИНИИ.

Шакиров М. А., Андрушук В. В., Ван Сынань. ДОСТОВЕРНОСТЬ 2Т-ОБРАЗНОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА.

Изложены ранее неизвестные особенности магнитного поля трансформатора в режимах короткого замыкания, которые подтверждены экспериментами, выполненными в лаборатории кафедры теоретических основ электротехники, и доступны для реализации в учебном процессе. Полученные результаты совместимы с новыми 2Т-образными схемами замещения трансформаторов.

ТРАНСФОРМАТОР. МАГНИТНЫЙ ПОТОК. ЯРМО. ОБМОТКА. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ.

Шакиров М. А., Ван Сынань. УТОЧНЕННАЯ 2Т-ОБРАЗНАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА.

Разработана новая 2Т-образная схема замещения трансформатора, основанная на его магнитоэлектрических моделях, позволяющая учитывать особенности распределения магнитных потоков в стыковых ярмах.

ТРАНСФОРМАТОР. СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ. МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ. ХОЛОСТОЙ ХОД. ЯРМО. ОБМОТКИ.

Сергеев В. В., Алешина А. С. ПРЕДПОСЫЛКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА.

Произведен анализ твердых бытовых отходов. Приведен их морфологический и химический состав. Рассмотрены основные технологии переработки ТБО, определены их преимущества и недостатки. Разработана газогенераторная дизельная электростанция.

ТВЕРДЫЕ БЫТОВЫЕ ОТХОДЫ. ГАЗИФИКАЦИЯ. ГАЗОГЕНЕРАТОРНАЯ ДИЗЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ

Усынин Ю. С., Остроухов В. В. ПРИМЕНЕНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В МЕХАНИЗМАХ ПОДАЧИ СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ.

В статье рассмотрен вопрос применения индивидуального электропривода в поворотно-подающих механизмах станов холодной прокатки труб ХПТ-450. На примере электропривода подачи рассмотрены задачи получения математического описания механизма, оптимизации быстродействия и повышения точности электропривода, выбора оптимальных параметров силового оборудования.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. СТАН ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ. ИНДИВИДУАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНИЗМА ПОДАЧИ

Андреев К. Д., Полищук В. Г., Рассохин В. А., Соколов Н. П. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ТЕПЛООТДАЧИ В ПРЯМЫХ ЩЕЛЕВЫХ КАНАЛАХ.

Представлены результаты опытного исследования гидравлических характеристик и теплообмена в модельных каналах со смерчевыми трактами, сформированными упорядоченными системами небольших углублений со сферической поверхностью. Исследование выполнялось продувкой экспериментальных моделей воздухом.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. ТЕПЛООБМЕН. УПОРЯДОЧЕННАЯ СИСТЕМА УГЛУБЛЕНИЙ. ЛУНКА. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ.

Нусратуллин Э. М. УПРОЧНЕНИЕ ХВОСТОВИКА ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА ЗА СЧЕТ АРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОМОДУЛЬНЫМИ ВОЛОКНАМИ.

В статье рассмотрена задача управления напряженным состоянием в месте перехода пера лопатки к хвостовику.

КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ. ЛОПАТКА. МОДЕЛИРОВАНИЕ. БОРНЫЕ ВОЛОКНА. ОПТИМИЗАЦИЯ.

Русинов Р. В., Добрецов Р. Ю. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДИЗЕЛЕЙ С ГАЗОТУРБИННЫМ И МЕХАНИЧЕСКИМ НАДДУВОМ.

Рассмотрен вопрос о количественной сравнительной оценке эксплуатационных характеристик дизелей с газотурбинным и механическим наддувом.

ДИЗЕЛЬ. РАБОЧИЙ ЦИКЛ. ЭКОНОМИЧНОСТЬ.

Борисевич А. В., Гедько П. Ю., Смирнов А. Б. МИКРОРОБОТ НА БАЗЕ СФЕРИЧЕСКОГО ШАРНИРА С ПЬЕЗОПРИВОДОМ.

Статья посвящена вопросу построения микроробота на базе сферического шарнира. Рассмотрены вопросы выбора и расчета привода шарнира, разработки систем управления и обратной связи, приведены описание и иллюстрации собранных прототипов.

МИКРОРОБОТ. СФЕРИЧЕСКИЙ ШАРНИР. ПЬЕЗОПРИВОД. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ. АЛГОРИТМ ЛИНЕЙНОГО РЕГУЛЯТОРА. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ.

Иванов В. Ю. О ВЛИЯНИИ КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ ШАРНИРА НА РЕШЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ

В статье рассмотрена задача, связанная с определением контактных параметров напряженного состояния плоского цилиндрического шарнирного соединения с учетом диаметрального габарита полого тела.

ШАРНИРНОЕ СОЕДИНЕНИЕ. КОНТАКТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ.

Цветкова Г. В., Скотникова М. А., Белов Ю. М., Крылов Н. А., Иванов Е. К. СТРУКТУРНОЕ И ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ НАПЛАВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК СМЕСИТЕЛЕЙ.

Приведены результаты исследования с помощью методов оптической и электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, испытаний на твердость и износостойкость, свойств наплавленных материалов с аустенитно-мартенситной структурой и с различным количеством упрочняющих фаз. Показано, что содержание в наплавочном материале 38 % аустенита, 32 % мартенсита и 30 % упрочняющих фаз обеспечивает наиболее высокую относительную износостойкость ($\epsilon = 5,89$) и твердость (HRC 61).

НАПЛАВКА. ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ. РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ. ОПТИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ.

Шлепетинский А. Ю., Манжула К. П. КОЭФФИЦИЕНТЫ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ В КРЕСТОВОМ СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ С НЕПРОВАРОМ.

В работе изложена методика расчета методом конечных элементов коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в вершине трещины, растущей от непровара. Исследовано влияние геометрии сварного соединения на изменение КИН. Представлены результаты расчетов по предложенной методике и по методикам других авторов КИН крестового соединения при растяжении.

ТРЕЩИНА. КОЭФФИЦИЕНТ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ. НЕПРОВАР. ДОЛГОВЕЧНОСТЬ.

Левина Г. А., Дрокин В. В. НАГРУЗОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕПЕСТКОВЫХ РАДИАЛЬНЫХ ПОДШИПНИКОВ ТУРБОМАШИН.

В статье рассмотрены вопросы математического моделирования нагрузочных характеристик радиальных лепестковых газодинамических подшипников. Приведено краткое описание специализированной программы для ЭВМ, представлены результаты численного моделирования.

ЛЕПЕСТКОВЫЕ ПОДШИПНИКИ. НАГРУЗОЧНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Галёркин Ю. Б., Солдатова К. В., Дроздов А. А. УТОЧНЕНИЕ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА В ЦЕНТРОБЕЖНОЙ КОМПРЕССОРНОЙ СТУПЕНИ.

Уточнен способ моделирования газодинамических характеристик центробежных компрессоров в Методе универсального моделирования — предложен учет изменения плотности газа в элементах проточной части. Сопоставлены скорости, рассчитанные с учетом и без учета изменения плотности в горле межлопаточного канала.

МЕТОД УНИВЕРСАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. ЭМПИРИЧЕСКИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ. ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ КОМПРЕССОРЫ. СЖИМАЕМОСТЬ. ИЗМЕНЕНИЕ ПЛОТНОСТИ.

Грязнов Н. А., Кириченко В. В., Кочкарев Д. А. МОНИТОРИНГ ФАКТОРОВ ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА НА БАЗЕ СВЕРХМАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.

Предложена идея создания программы и кооперации в области разработки датчиков различных параметров околоземного пространства и — в качестве платформы для них — сверхмалых космических аппаратов. Сделан вывод об экономической обоснованности и технической реализуемости проекта формирования кластера распределенных орбитальных сетей. Предложен принципиально новый подход к формированию кооперации разработчиков — создание сети исследовательских стендов за счет стандартизации носителей и унификации интерфейсов всех подсистем.

КОСМОС. СМКА. НАНОСПУТНИК. ИЗМЕРЕНИЕ. ДАТЧИК. РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СЕТЬ. КООПЕРАЦИЯ РАЗРАБОТЧИКОВ.

Рудской А. И., Кокорин В. Н. ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРЕССОВАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛОСодержащих МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЖИДКИХ ФАЗ.

Рассмотрены вопросы утилизации твердых отходов производств черной металлургии. Приведены основные технологические решения получения качественных брикетов, используемых в качестве вторичного сырья.

УТИЛИЗАЦИЯ. ОТХОДЫ. ТЕХНОЛОГИЯ. БРИКЕТЫ. СЫРЬЕ.

Носов В. В., Жильцов А. П., Лаврин В. Г. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЗАГОТОВОК ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ГОРЯЧЕКАТАНОЙ ПОЛОСЫ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ.

Подтверждена возможность использования метода акустической эмиссии для контроля качества слэбов и прогнозирования дефектности полученной полосы. Определены условия проведения контроля и параметры акустической эмиссии, наиболее информативные для этих целей при производстве проката.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ. ДЕФЕКТ. КАЧЕСТВО. СЛЭБ. ПРОКАТКА. ГОРЯЧЕКАТАНАЯ ПОЛОСА.

Туричин Г. А., Цибульский И. А., Кузнецов М. В., Сомонов В. В., Валдайцева Е. А. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРИСТОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ И ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКЕ.

Приведены результаты исследований причин возникновения таких дефектов сварных швов, как поры и непровары, характерные для сварки алюминиевых сплавов. Моделирование процессов лазерной и лазерно-дуговой сварки показало, что при сварке алюминиевых сплавов характерно изменение химического состава металла шва в результате интенсивного испарения легколетучих компонентов. Описаны экспериментальные исследования процессов лазерной и лазерно-дуговой сварки, направленные на снижение пористости швов путем сканирования лазерным лучом внутри сварочной ванны.

АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ. ПОРИСТОСТЬ. ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА. ЛАЗЕРНО-ДУГОВАЯ СВАРКА.

Туричин Г. А., Цибульский И. А., Кузнецов М. В., Сомонов В. В. ГИБРИДНАЯ ЛАЗЕРНО-ДУГОВАЯ СВАРКА МЕТАЛЛОВ БОЛЬШИХ ТОЛЩИН.

Описаны теоретические и экспериментальные исследования, направленные на разработку технологии гибридной лазерно-дуговой сварки плавящимся электродом при использовании мощного волоконного лазера. Освещено математическое моделирование процесса формирования сварного шва, проанализировано динамическое поведение сварочной ванны, которое во многом определяет качество сварного соединения. С помощью математического моделирования авторам удалось определить диапазоны изменения характеристик сварочной ванны и параметров сварочного процесса, что позволило существенно сократить объем технологических экспериментов.

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ СТАЛИ. АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ. ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА. ЛАЗЕРНО-ДУГОВАЯ СВАРКА.

Фролов В. Я., Смирнова Е. А., Юшин Б. А. ПРИМЕНЕНИЕ УСКОРЕННОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ.

Предложен метод повышения эксплуатационных свойств самофлюсующихся покрытий путем высокочастотной индукционной обработки. Представлено аналитическое исследование эффектов, возникающих при индукционном нагреве слоистых сред. Представлены результаты математического моделирования процесса индукционной термообработки, а также результаты лабораторных исследований покрытий, обработанных индукционным способом.

ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ОБРАБОТКА. ОБРАБОТКА ПОКРЫТИЙ. ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ. ПЛАЗМЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ. САМОФЛЮСУЮЩИЕСЯ ПОКРЫТИЯ. НАГРЕВ СЛОИСТЫХ СРЕД. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА

Радкевич М. М., Новиков А. И., Фомин Д. Ю. ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ПРОГРАММНОЙ МЕХАНИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ.

Рассмотрены вопросы формирования субструктурного состояния сталей при комбинированном методе упрочняющей обработки – программной механико-термической обработке (ПМТО).

Сделана попытка объяснить возможность и условия получения в результате ПМТО более однородной и равноосной микроструктуры сталей.

Проанализированы условия выбора режимов ПМТО, обеспечивающих более высокий комплекс механических свойств стальных изделий.

ПРОГРАММНАЯ МЕХАНИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА. СТРУКТУРА СТАЛИ. ДИСЛОКАЦИЯ. РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ. УПРОЧНЕНИЕ. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Иваньков С. А., Башкарев А. Я. О ДОЛГОВЕЧНОСТИ И ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИТОВ.

В рамках кинетической теории прочности на примере пары полиамид – сталь показан способ получения численных значений основных параметров, необходимых для определения долговечности адгезионного соединения. Метод основан на результатах изучения технологических режимов нанесения полимерных антифрикционных покрытий.

ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ ПРОЧНОСТИ. ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ. ПОЛИАМИДНЫЕ АНТИФРИКЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ.

Соколов С. А., Грачев А. А. УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛАСТИН С РЕБРАМИ.

Рассмотрена устойчивость прямоугольных пластин подкрепленными одним или двумя продольными ребрами жесткости при различных видах нагружения нормальными напряжениями. Даны рекомендации по оценке коэффициента запаса устойчивости рассмотренных пластин с ребрами.

ПЛАСТИНА. НОРМАЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ. УСТОЙЧИВОСТЬ. КРИТИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ. ОПТИМАЛЬНОЕ РЕБРО ЖЕСТКОСТИ

Арефьев Н. В., Баденко В. Л., Латышев Н. К. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ГИДРОМЕЛИОРАТИВНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА И ПРИРОДООБУСТРОЙСТВА.

В статье обобщен опыт разработки геоинформационных аналитических систем для поддержки принятия управленческих решений в области гидромелиоративного строительства и природообустройства. Сформулированы общие концептуальные положения, которые служат методической основой для разработки подобных систем при создании природно-технических комплексов. Эти положения были практически реализованы при создании информационно-аналитической системы для эталонной природно-аграрной геосистемы в Ленинградской области.

ГЕОЭКОЛОГИЯ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. ПРИРОДНО-АГРАРНЫЕ ГЕОСИСТЕМЫ

Горбовская А. Д., Бахматова К. А., Матинян Н. Н. ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЗАКАЗНИКА «ЛАММИН-СУО».

В статье приведены данные об экологическом состоянии регионального заказника «Ламмин-Суо», полученные с использованием физико-химических и биологических методов.

ПОЧВЕННЫЙ ПОКРОВ. ЭКОЛОГИЯ. АНТРОПОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ. ТИП ПОЧВ. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ. БИОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Маркелова Е. А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА БИОДЕСТРУКЦИИ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ВОДНОЙ СРЕДЫ.

Статья посвящена экспериментальному исследованию гидравлических характеристик биосорбента, а также решению уравнений турбулентной диффузии движения частиц биосорбента. Результаты помогут спрогнозировать изменение времени биодеструкции в зависимости от экономического использования биосорбента, глубины водоема и других факторов турбулентности.

ТУРБУЛЕНТНАЯ ДИФфуЗИЯ. РАЗЛИВЫ НЕФТИ. БИОСОРБЕНТЫ. ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ.

Стрелец К. И. О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПЫЛИ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ПРИ РАСЧЕТЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕУДАЛЕНИЯ В ЦИКЛОНЕ.

Работа посвящена рассмотрению свойств частиц пыли, подлежащих удалению в центробежных пылеуловителях — циклонах. Предложено в качестве основной характеристики частиц при расчете эффективности пылеулавливания использовать гидравлическую крупность частиц (вместо геометрического диаметра). Предложены способы определения гидравлической крупности и введения этой характеристики в расчет эффективности циклона.

ЦИКЛОН. ГРАВИТАЦИОННАЯ ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ КРУПНОСТЬ. ЦЕНТРОБЕЖНАЯ ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ КРУПНОСТЬ ЧАСТИЦ.

Романченко О. В. ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ

В статье рассмотрены ключевые теоретические и ряд методических подходов к геодезическому обеспечению строительных проектов. Определены место и роль геодезических проектов в едином процессе организации разработки планов строительства.

ЭКОНОМИКА СТРОИТЕЛЬСТВА. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ.

Тедеев Т. Р., Рутковский А. Л. К ВОПРОСУ ЦЕЛЕСООБРАЗНОГО ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ.

Представлены результаты расчета модельной задачи взаимодействия конструкций с упругим основанием. Показано, что контактные напряжения целесообразно перераспределить таким образом, чтобы наибольшие значения были сконцентрированы в центральной части контактной поверхности, что существенно снизит в расчетных сечениях изгибающие моменты и поперечные усилия.

МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. КОНТАКТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ. СТРУКТУРНО-НЕУСТОЙЧИВАЯ СРЕДА. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ.

Сыров А. А., Храмов А. В. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЙ.

Рассмотрены современные подходы к оценке возможных последствий радиационных аварий. Предложены критерии оценки по международной шкале INES, позволяющей более детально учитывать неблагоприятные последствия радиационных аварий.

РАДИАЦИОННАЯ АВАРИЯ. ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА. ЗАРАЖЕНИЕ МЕСТНОСТИ. ПЯТНО ЗАГРЯЗНЕНИЯ.

Гуменюк В. И., Храмов А. В. ПРОБЛЕМЫ УЧЕТА ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ТРАНСПОРТНЫХ УСТАНОВОК.

Рассмотрены современные проблемы учета отработанного ядерного топлива транспортных установок военных кораблей и гражданских судов. Предлагаются меры по систематизации учета и хранения расщепляющихся материалов.

ОТРАБОТАННОЕ ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО. ЯДЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. УЧЕТ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ. ТРАНСПОРТНЫЕ УСТАНОВКИ. РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ.

Туманов А. Ю., Домаков В. В., Кондратьев В. Г. ОПАСНЫЕ ТЕХНОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ И ТРЕБОВАНИЯ ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ЗАЩИТЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ.

Дана подробная характеристика основных техногенных факторов воздействий. Сформулированы требования предъявляемые к защите энергетических народнохозяйственных объектов. Определена и рассмотрена совокупность детерминированных и стохастических факторов воздействия на энергетические объекты.

ПОРАЖАЮЩИЕ ФАКТОРЫ. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ ОБЪЕКТ. ТЕХНОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ. КЛАССИФИКАЦИЯ. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАЩИЩЕННОСТИ.

Атоян Г. Л., Кондратьев В. Г. ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ ЗАЩИТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ АГРЕССИВНОЙ МЕНЯЮЩЕЙСЯ СРЕДЫ.

Рассмотрена совокупность принципов системного анализа при реализации организационного проектирования независимых систем управления и защиты энергетических установок при воздействии на них агрессивной меняющейся среды.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ. АГРЕССИВНАЯ СРЕДА. ЗАЩИТА. ОРГАНИЗАЦИОННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ. СТРУКТУРНО СИСТЕМНЫЙ ПРИНЦИП ЗАЩИТЫ.

Соловей К. С., Кондратьев В. Г. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ВНУТРЕННИХ И ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ.

Проведен анализ методов защиты энергетических народнохозяйственных объектов в меняющейся среде хозяйствования. Представлены четыре основных направления совершенствования структуризации для обеспечения защиты энергообъектов.

МЕТОДЫ СТРУКТУРИЗАЦИИ. ЭНЕРГООБЪЕКТЫ. КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗАЩИТОЙ. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД.

Иванова Т. Ю. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ.

Рассмотрено применение задач математического программирования при решении проблем управления в чрезвычайных ситуациях. Особое внимание уделено вопросу планирования необходимых сил и средств при ликвидации аварийных разливов нефти.

УПРАВЛЕНИЕ. ЧРЕЗВЫЧАЙНАЯ СИТУАЦИЯ. ПРОГРАММИРОВАНИЕ. НЕФТЬ. МЕТОДИКА.

Акулов А. Ю., Иванов В. А., Аксенов А. В. ОГНЕЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ТЕРМОСТОЙКИХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Приведена необходимость разработки состава на основе минеральных заполнителей для огнезащиты металлических конструкций нефтегазовой отрасли. Определены основные физико-механические свойства и огнестойкость. Приведена методика проектирования огнезащитных составов на основе минеральных термостойких заполнителей.

ОГНЕСТОЙКОСТЬ. ОГНЕЗАЩИТНЫЙ СОСТАВ. НЕВСПУЧИВАЮЩИЕСЯ И ВСПУЧИВАЮЩИЕСЯ СОСТАВЫ. МИНЕРАЛЬНЫЕ ТЕРМОСТОЙКИЕ ЗАПОЛНИТЕЛИ. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВОВ.

Бараковских С. А., Иванов В. А., Плотников С. А. ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОЖАРА НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА.

Исследованы теплофизические свойства конструкций, поглощающих тепловое излучение при пожарах на объектах нефтегазовой промышленности. Предложены конструкции противопожарной защиты на основе воздушно-механической пены и твердых материалов.

ИЗЛУЧЕНИЕ. ВОЗДУШНО-МЕХАНИЧЕСКАЯ ПЕНА. ОГНЕЗАЩИТНАЯ КОНСТРУКЦИЯ. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ. ПЛОТНОСТЬ. ТЕПЛОЕМКОСТЬ.

Рудской А. И., Колбасников Н. Г., Зотов О. Г., Лукьянов А. А. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ: ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ.

Выполнены расчеты температурной зависимости ударной вязкости на образцах из нескольких марок сталей и сравнение расчетов с фактическими данными. Показано, что в процессе пластической деформации во время испытаний на ударную вязкость значительно изменяется реологическое уравнение материала, что обусловлено, очевидно, изменением структуры и механизма деформации. Получены соотношения, описывающие зависимости ударной вязкости от температуры.

УДАРНАЯ ВЯЗКОСТЬ. МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ. ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ. РЕОЛОГИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ.

Грязнов Н. А., Кириченко В. В., Кочкарев Д. А., Лопота А. В. КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ СЕНСОРНЫХ СРЕДСТВ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПЛАТФОРМЫ И ОБЪЕКТА.

На базе бионического подхода к проблеме анализа окружающей обстановки предложена идея аппаратного разделения систем технического зрения и оптического дистанционного осязания. Проанализированы преимущества использования лазерно-телевизионной триангуляционной системы формометрии для реализации функции дистанционного осязания. Рассмотрены вопросы комплексирования сенсорных средств технического зрения и осязания для мобильных платформ и манипуляторов, функционирующих в автономном или полуавтономном режимах.

ФОРМОМЕТРИЯ. ДИСТАНЦИОННОЕ ОСЯЗАНИЕ. ЛАЗЕРНАЯ СТРУКТУРИРОВАННАЯ ПОДСВЕТКА. МОБИЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА. ТЕЛЕВИЗИОННАЯ КАМЕРА. КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ.

Птицына Л. К., Птицын А. В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ.

Рассматриваются типовые приемы комплексирования программных и аппаратных средств защиты информации, формируется расширенный базис моделей комплексирования, выводятся аналитические соотношения для определения средних времен защиты информации при распределенной обработке данных объединяемых средств.

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ. КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ПРОГРАММНЫХ И АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ. РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА. МОДЕЛИ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

Розин Л. А., Лукашевич А. А. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧ С ТРЕНИЕМ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ.

Предложен численный подход к решению динамических контактных задач при наличии трения кулона. Решение строится на основе метода пошагового моделирования (по времени) с использованием контактных конечных элементов рамного типа. Приведенный алгоритм проиллюстрирован численным примером.

КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА. ТРЕНИЕ КУЛОНА. ПОШАГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. КОНТАКТНЫЙ ЭЛЕМЕНТ.

Вольнов И. Н., Нагорный В. С. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ МОНОДИСПЕРСНЫХ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ В ЭЛЕКТРОКАПЛЕСТРУЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ.

Рассмотрено численное моделирование в программе FLOW-3D® задачи об образовании монодисперсного потока капель при наложении на рабочую жидкость гармонических вынужденных возмущений от пьезоэлектрического преобразователя. Подробно описан метод численного решения задачи с использованием математической модели процесса. Выполнено сопоставление результатов моделирования и натурального эксперимента.

СТРУЯ. МОНОДИСПЕРСНЫЙ ПОТОК КАПЕЛЬ. ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ.

Солдатова К. В. УТОЧНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ПОТЕРЬ И НАПОРА В ПРОГРАММАХ МЕТОДА УНИВЕРСАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.

По проектам, которые выполнены с использованием Метода универсального моделирования, выпущено более 35 типов промышленных центробежных компрессоров. Газодинамические характеристики 16 компрессоров полученные при заводских испытаниях, сопоставлены с проектными. После уточнения эмпирических коэффициентов, характеристики моделируются во всем рабочем диапазоне с большой точностью. Характеристики 81 ступени, входящих в состав компрессоров, включены в банк данных для использования при разработке новых проектов.

МЕТОД УНИВЕРСАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. ЭМПИРИЧЕСКИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ. ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ КОМПРЕССОРЫ. МОДЕЛЬНЫЕ СТУПЕНИ.

Фролов В. Я., Кархин В. А., Зверев С. Г., Иванов Д. В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ПОРОШКА В ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ.

Статья посвящена исследованию поведения мелких частиц в плазме, включая динамику движения частицы в плазме (расчет траектории и скорости движения частицы), нагревание и испарение частицы в плазме (расчет изменения температуры и массы частицы). Предлагаемая методика позволяет наилучшим образом оценить режимы испарения мелкодисперсного порошка в плазменной струе и подобрать оптимальные рабочие параметры установки, влияющие на качество получаемого нанодиоксида титана и на производительность.

ВЧИ ПЛАЗМА. ПЛАЗМОТРОН. НАНОМАТЕРИАЛЫ. НАНОПОРОШОК. ДИОКСИД ТИТАНА.

Фролов В. Я., Лопота А. В., Петров Г. К., Иванов Д. В. РАЗРАБОТКА ДУГОВОГО ПЛАЗМОТРОНА ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ИНИЦИИРОВАНИЯ ИНДУКТИВНО СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЫ.

Приведены результаты математического моделирования плазменных процессов в дуговом плазмотроне постоянного тока и их анализ, легший в основу выбора параметров конструкции дугового плазмотрона, а также результаты экспериментальных исследований по определению параметров, влияющих на длину плазменной струи. Полученные результаты могут быть использованы специалистами при разработке плазменного оборудования, предназначенного для получения наноматериалов.

ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. НАНОРАЗМЕРНЫЕ ПОРОШКИ. ДИОКСИД ТИТАНА. ДУГОВОЙ ПЛАЗМОТРОН. ПЛАЗМЕННЫЙ ФАКЕЛ.

Сикоев З. Х., Асфондиярова И. В. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА И ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ.

Описаны различные методы и с их использованием выполнены исследования качества растительных масел, представленных на рынке Российской Федерации. Дана сравнительная и прогнозная оценка развития современных аналитических экспресс-методов исследования. Описаны перспективы и преимущества данных видов экспертизы качества.

ИНФРАКРАСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. КАЧЕСТВО МАСЕЛ.

Марценюк М. А., Сивков В. Г., Скляренко М. С. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА В СОВРЕМЕННОМ ПРАКТИКУМЕ.

Явления, протекающие в электрических цепях не доступны непосредственному наблюдению. Компьютерные методы позволяют преодолеть эту трудность. В работе предложено для визуализации токов и качественных наблюдений картины их протекания в цепочках RC и RL использовать лампу накаливания. Для количественной интерпретации наблюдений с помощью скоростной цифровой фотосъемки устанавливается связь между яркостью свечения лампы и током в цепи. Для облегчения понимания явлений в цепочках RC , RL и колебательном контуре предложены новые механические модели, более точно им соответствующие, чем обычно используемые. Дальнейшие опыты проводятся только на основе показаний цифровых приборов и компьютерной обработки полученных данных, что позволяет выявить закономерности, трудно доступные аналоговым способам исследования.

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР. ОБУЧЕНИЕ. ФОТОСЪЕМКА. КОМПЬЮТЕРНЫЕ МЕТОДЫ.

Колбасников Н. Г., Зотов О. Г., Лукьянов А. А. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ СТАЛЕЙ ПАДАЮЩИМ ГРУЗОМ И ДОЛИ ВЯЗКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ИЗЛОМЕ.

В работе создана компьютерная модель испытания падающим грузом при помощи лицензионного компьютерного продукта ANSYS/LS DYNA для расчетов быстропротекающих процессов, которая позволяет оценить долю вязкой составляющей разрушения в изломе. Компьютерные эксперименты по изучению влияния механических свойств и структурной неоднородности металла на долю вязкой составляющей показали, что в трубных марках стали значение этой доли в основном определяется свойствами феррита. Показано, что наряду с установленными закономерностями на долю вязкой составляющей может существенное влияние случайный фактор, например присутствие «слабого звена» в виде высокоэнергетических межзеренных границ.

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ. ИСПЫТАНИЯ ПАДАЮЩИМ ГРУЗОМ. ВЯЗКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА. СТРУКТУРА.

Космач В. Ф. КВАНТОВОСТЬ ОРБИТ ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ.

Предложен квантово-механический метод анализа системы планет Солнца.

КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКИЙ МЕТОД. СИСТЕМА ПЛАНЕТ СОЛНЦА.

Баранова И. И. ТЕСТИРОВАНИЕ В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ ОБУЧЕНИЯ РУССКОМУ ЯЗЫКУ КАК ИНОСТРАННОМУ.

Статья посвящена проблеме контроля в системе обучения иностранных студентов русскому языку в вузах Российской Федерации. Тестирование рассматривается в качестве формы контроля уровня владения русским языком как иностранным.

РУССКИЙ ЯЗЫК КАК ИНОСТРАННЫЙ. СИСТЕМА КОНТРОЛЯ. ТЕСТИРОВАНИЕ КАК ФОРМА КОНТРОЛЯ.

Афанасьева И. Б. ФОРМИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ УМЕНИЙ В ОБУЧЕНИИ.

Рассмотрены теоретические и методические основы формирования интеллектуальных умений в обучении. В рамках реализуемой технологии обучения, ориентированной на интеллектуальное воспитание, выделены геометрические и учебные задачи, общие и специфические приемы учебной деятельности.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ УМЕНИЯ. ТЕХНОЛОГИЯ ОБУЧЕНИЯ. УЧЕБНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ.

Тучкевич Е.И. ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ МАГИСТРОВ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «ДИЗАЙН».

Разработка в СПбГПУ новой педагогической технологии формирования ключевых профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВПО предполагает достижение целей и результатов обучения по дисциплине «Компьютерный дизайн» с четко выраженным акцентом на деятельностный компонент, а именно: формирование у магистров по направлению подготовки 072500 «Дизайн» умения решать обобщенные задачи профессиональной деятельности и необходимого для этого знаний и понимания, умения и навыков, опыта, соответствующего профессионального поведения, позволяющих выпускникам программы проявлять ключевые профессиональные компетенции ПК-1 – ПК-7, ПК-10 в соответствии с ФГОС ВПО.

КОМПЕТЕНЦИЯ. КОМПЕТЕНТНОСТНЫЙ ПОДХОД. КЛЮЧЕВЫЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ. ТЕХНОЛОГИЯ ОБУЧЕНИЯ.

Корнеев В. Г. КОММЕНТАРИИ К СТАТЬЕ М.В. КОВТУН, О.П. РОДИОНОВОЙ И С.В. ЛУПУЛЯКА “БЫСТРЫЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ”.

В статье обсуждается численный метод решения контактных задач, предложенный М.В. Ковтун, О.П. Родионовой и С.В. Лупуляком (2009). Показывается, что предложения авторов основаны на ложных предпосылках и «метод» не имеет смысла в случае контактов линейно упругих тел двух и трех измерений либо контактов таких тел с препятствиями. Обсуждаются также быстроедействие применяемых при решении контактных задач алгоритмов и численные эксперименты.

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ. КОНТАКТНЫЕ ЗАДАЧИ. БЫСТРЫЕ АЛГОРИТМЫ.

ABSTRACTS

KEYWORDS

Petrenya Y. K., Saykova M. S. TECHNOLOGICAL FLAWS INFLUENCE TO THE STRENGTH AND SERVICE LIFE OF POWER STATIONS CYLINDRICAL ELEMENTS AT NONSTATIONARY TEMPERATURE REGIMES.

For the purpose of definition of influence of defects of type stratification on the is intense-deformed condition of cases of the power equipment is investigated a problem about a cylindrical cover with the thermoisolated cracks at non-stationary temperature influence. Are considered a case of change of temperature of environment with constant speed and thermoblow. The numerical decision of a problem is received by a method of final elements. On the basis of the received results the analysis of possible behavior of stratifications while in service is given.

POWER STATION. LAMINATION. STRESS INTENSITY FACTOR. FINITE ELEMENT METHOD. THERMAL TRANSIENT. STRENGTH AND LIFETIME.

Petin V. V., Batuhitin A. G., Kalugin A. V., Safronov P. G. MODERN TECHNOLOGIES OF USING ELECTRIC ENERGY IN CENTRALIZED HEAT SUPPLY SYSTEMS.

In article the evaluation of using new technologies in utilization of electric energy for increasing of functionality and available capacity of centralized heat supply systems efficiency is given. A new method of central qualitative regulation of heat release with temperature correction of heat carrier in heat systems and combination of open and close heat release schemes for HWS needs is offered.

HEAT PUMP. OPTIMIZATION. EFFICIENCY. CENTRALIZED HEAT SUPPLY SYSTEM

Andreev M. A., Vodovozov A. M. PARAMETER IDENTIFICATION OF THE ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE BY TRANSIENT PROCESS IN POWER CIRCUIT.

The theoretical, methodological and practical aspects of parameter identification of the asynchronous electric drive during intercommutation intervals of autonomous inverter power switches are considered in this article.

IDENTIFICATION. ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE. MATHEMATICAL MODEL. INTERCOMMUTATION INTERVAL. PARAMETER.

Svetozarskaya S. V., Kubishkin L. I. PARAMETRIC MODELING OF RENEWABLE ENERGY OBJECTS.

The item of the automation renewable energy objects developing and their parametrical modeling method is considered in the article. The basic features of parametrical modeling with using universalize models of the equipment and constructions of hydropower objects are addressed by the authors of the article.

PARAMETRIC MODELING. THREE-DIMENSIONAL MODEL. RENEWABLE ENERGY OBJECTS. HYDROPOWER OBJECTS. PARAMETRIC MODELS LIBRARY

Batuhitin A. G. PECULIARITIES OF MODELLING OF USING HELIOHEATING INSTALLATIONS BY CONSUMERS OF HEAT ENERGY WITHIN 24 HOURS.

Peculiarities of modelling of using helioheating installations by consumers of heat energy within 24 hours are considered in the article. Method of HWS loading determination within 24 hours, model of solar radiation flux change within 24 hours and also running water and accumulator box helioheating installations is offered.

HELIOHEATING INSTALLATIONS. SYSTEM OF CENTRALIZED HEAT SUPPLY. SOLAR ENERGY

Grigoryev K. A. LAW OF FUEL CRUSHING IN MILLS: THEORY AND EXPERIMENT.

Results of theoretical and experimental researches of fuel crushing in laboratory and industrial mills are reported. Experimental verification of the Rittinger's law of crushing is obtained.

CRUSHING. GRINDING. A MILL. SOLID FUEL. RITTINGER'S LAW.

Shevchenko N. J. ANALYSIS OF THE PROJECTED MECHANICAL LOADS ON THE WIRES SECTION OF OVER HEAD POWER TRANSMISSION LINES TO BE RECONSTRUCTED.

Results of calculation and analysis of expected mechanical loadings on wires on the over-head power lines are presented. The optimal variant of reconstruction of overhead power lines working in extreme weather conditions.

OVER-HEAD LONG-DISTANCE TRANSMISSION LINES. ICE-WIND LOADS. RECONSTRUCTION VARIANTS. OVER-ALL LINE DIMENSION.

Shakirov M. A., Wang Sinan. IMPROVED 2T-SHAPED EQUIVALENT CIRCUIT OF TRANSFORMER.

A new 2T-shaped equivalent circuit of transformer, based on magneto electrical equivalent circuits, that permits to account a peculiarity of magnetic flow distribution in joint yoke is proposed and presented.

TRANSFORMER. EQUIVALENT CIRCUITS. MAGNETIC NETWORK. ELECTRIC NETWORK. CURRENT SURGE. YOKE. WINDINGS.

Shakirov M. A., Andrushuk V. V. Wang Sinan. TRUTH OF THE 2T-SHAPED EQUIVALENT CIRCUIT OF POWER TRANSFORMER.

Some previously unknown transformer magnetic field abnormalities in short circuit regimes, documented by experiments in the subdepartment of «Theoretical foundation of electrical engineering» and accessible for realization in training process, are presented. Received results is compatible with new 2T-circuit transformer model.

TRANSFORMER. MAGNETIC CURRENT. YOKE. WINDING. SHORT CIRCUIT.

Sergeev V. V., Aleshina A. S. BASIS FOR USING MUNICIPAL SOLID WASTES AS A FUEL.

The analysis of municipal solid wastes was done. Their morphological and chemical composition was given. The basic technologies for processing solid waste, determine their advantages. Developed a gas-diesel power plant MUNICIPAL SOLID WASTES. GASIFICATION. DIESEL GASIFIER POWER PLANT

Usynin J. S., Ostrouhov V. V. APPLICATION OF THE INDIVIDUAL ELECTRIC DRIVE IN FEEDERS OF CAMPS COLD PROSKATING RINKS OF PIPES.

The problems of applying individual electric drives for the rotating and feeding mechanisms of cold rolling mills are concerned in the article. The feed mechanism is used as an example of creating a mathematical simulator, speed optimization, increasing the accuracy, choosing optimal parameters of power equipment.

MATHEMATICAL SIMULATION. COLD ROLLING MILL. INDIVIDUAL ELECTRIC DRIVE FOR A FEEDING MECHANISM

Andreev K. D., Polishchuk V. G, Rassokhin V. A, Sokolov N. P. RESEARCH OF HYDRAULIC CHARACTERISTICS AND T HEAT EMISSION IN DIRECT SLOT-HOLE CHANNELS.

Results of experimental research of hydraulic characteristics and heat exchange in modelling channels with the vortical paths generated by ordered systems of small deepenings with a spherical surface are presented. Research was carried out by a blowing of experimental models by air.

HYDRAULIC CHARACTERISTICS. HEAT EMISSION. THE ORDERED SYSTEM OF DEEPENINGS. HOLE. THE EXPERIMENTAL RESEARCH

Nusratullin E. M. CONTROLLING STRESS AND STRAIN STATE AT THE POINT OF COMPRESSOR BLADE CROSSING TO ITS SHANK BY REINFORCING HIGH MODULE FIBRES.

The article considers the problem of controlling stress and strain state at the point of compressor blade crossing to its shank.

COMPOSITE MATERIAL. BLADE. MODULATION. BORON FIBRES. OPTIMIZATION

Rusinov R. V., Dobretsov R. Yu. THE COMPARATIVE ANALYSIS of the OVERALL PERFORMANCE of DIESEL ENGINES WITH TURBO-SUPERCHARGING AND MECHANICAL PRESSURIZATION.

The question on a quantitative comparative estimation of operational characteristics of diesel engines with turbo-supercharging and mechanical pressurization is examined.

DIESEL ENGINE. RUNNING CYCLE. PROFITABILITY

Borysevitch A. V., Gedko P. J., Smirnov A. B. MICROROBOT ON THE BASIS OF SPHERICAL JOINT WITH PIEZO DRIVES.

This article is devoted to constructing microrobots based on a spherical joint, the questions of choice and calculation of the drive joint, the development of management systems and feedback, include a description and illustrations collected proto

THE MICROROBOT. THE SPHERICAL HINGE. PIEZO GEAR. THE CONTROL SYSTEM. ALGORITHM OF THE LINEAR REGULATOR. FEEDBACK TYPES

Ivanov V. J. INFLUENCE OF THE FINAL SIZES OF THE HINGE ON THE DECISION OF THE CONTACT PROBLEM.

In article states the problem connected with definition of contact parametres of the intense condition flat cylindrical articulated joint of connection with the account of an external dimension of a hollow body dares.

ARTICULATED JOINT. CONTACT PARAMETERS. INTENSE CONDITION

Tsvetkova G. V., Skotnikova M. A., Belov Y. M., Krylov N. A., Ivanov E. K. STRUCTURAL AND PHASE CONDITION FACING MATERIALS INTENDED FOR WORKERS BLADES AMALGAMATORS.

By means of methods of optical and electronic microscopy, X-ray analysis, tests for hardness and wear resistance, are resulted results of research and optimization of structure and properties facing materials with austenite-martensite structure and with various quantity of strengthening phases.

The maintenance in facing material austenite 38 % is shown, that, martensite 32 % and strengthening phases of 30 % provide the highest relative wear resistance $\varepsilon = 5,89$ and hardness HRC 61.

FACING. WEAR RESISTANCE. X-RAY ANALYSIS. OPTICAL AND ELECTRONIC MICROSCOPY

Shlepetinskiy A. J., Manzhula K. P. STRESS INTENSITY FACTORS FOR A CRACK FROM A LACK OF FUSION IN A FILLET WELD OF A CRUCIFORM JOINT.

The following work is dedicated to the method of calculation of the stress intensity factor (SIF) for a crack tip that takes its beginning at the root of a fillet weld with incomplete penetration (lack of fusion) using the finite element method (FEM). The influence of the cruciform joint geometrics upon the stress intensity factor has been analyzed. The results of the calculation performed in accordance with the proposed method for a fillet weld of a cruciform joint under the tensile load are presented in this paper. The obtained equation has been analyzed in the comparison with the well-known equation.

CRACK. STRESS INTENSITY FACTOR. LACK OF FUSION. FATIGUE LIFE TIME

Levina G. A., Drokin V. V. LOADING CHARACTERISTICS OF PETAL RADIAL BEARINGS OF TURBOMACHINES.

The problems of mathematical simulation of foil journal gas bearings' load curves are concerned in the article. A short description of the specific computer program is given and the results of computing are presented.

FOIL BEARINGS. LOAD CURVE. MATHEMATICAL SIMULATION

Galerkin Y. B., Soldatova K. V., Drozdov A. A. SPECIFICATION of ALGORITHM of CALCULATION of PARAMETERS of the STREAM IN the CENTRIFUGAL COMPRESSOR STEP.

The way of modelling gas dinamyc characteristics of centrifugal compressors in the Method of universal modelling is specified by the account of change of density of gas in elements of a flowing part. The speeds designed with the account and without taking into account change of density in a throat of the channel are compared.

THE METHOD OF UNIVERSAL MODELLING. EMPIRICAL FACTORS. CENTRIFUGAL COMPRESSORS. COMPRESSIBILITY. CHANGE OF DENSITY

Gryaznov N. A., Kirichenko V. V., Kochkarev D. A. NANOSATELLITE-BASED DISTRIBUTED NETWORKS FOR MONITORING OF NEAR-EARTH SPACE PARAMETERS.

The suggested idea of forming program and developer cooperation is based on design of miniature sensors, measuring different parameters of near-earth space, and a nanosatellite platform for them. The performed estimates proved financial reasonableness and technical realizability for the project directed on creating a cluster of distributed orbital networks. Principally new approach to formation of developer cooperation is creation of research facility network on a base of carrier standardization and unification of subsystem interfaces.

SPACE. NANOSATELLITE. MEASUREMENT. SENSOR. DISTRIBUTED NETWORK. DEVELOPER COOPERATION

Rudskoy A. I., Kokorin V. N. IMPLEMENTATION TECHNOLOGY OF PRESSING DISPERSED METAL MATERIALS IRON BASED WITH THE USE OF LIQUID PHASES.

The issues of utilization of solid industrial waste production of ferrous metallurgy.

The main technological solutions produce good quality briquettes are used as secondary raw materials.

RECYCLING, WASTE, TECHNOLOGY, BRIQUETTES, RAW

Nosov V. V., Zhil'cov A. P., Lavrin V. G. NONDESTRUCTIVE CONTROL QUALITY OF STOCK MATERIAL FOR PRODUCTION HOT-ROLLED STEEL BY ACOUSTIC EMISSION METHOD.

Possibility of use of a method of an acoustic emission for quality control of slabs and prediction of presence of defects of the hot-rolled steel is confirmed. Requirements of monitoring procedure and acoustic emission parameters, the most informative for quality control of stock materials for hot-rolled steel manufacture are defined.

NONDESTRUCTIVE CONTROL. ACOUSTIC EMISSION. DEFECT. QUALITY. SLAB. HOT-ROLLED STEEL. HOT-ROLLED PRODUCTION

Turichin G. A., Tsibulskii I. A., Kuznetsov M. V., Somonov V. V., Valdaitseva E. A. RESEARCH OF POROSITY FORMATION AT LASER AND LASER-ARC WELDING OF ALUMINUM ALLOYS.

In this article there are shown results of researches of causes of origins of such weld defects as pores and lacks of penetration that are typical for welding of aluminum alloys. Simulation of the processes of laser and laser-arc welding indicates that the chemical composition of the weld metal changes due to intensive evaporation of the volatile components and it is a feature of welding of aluminum alloys. In the article there are described the experimental researches of laser and laser-arc welding that are directed on decrease of the weld porosity by laser beam scanning in the melting pool.

ALUMINUM ALLOYS. POROSITY. LASER WELDING. LASER-ARC WELDING

Turichin G. A., Tsibulskii I. A., Kuznetsov M. V., Somonov V. V. HYBRID LASER-ARC WELDING OF THE THICK-WALLED METALS.

In the article there are described theoretical and experimental researches on developing a new technology of the hybrid laser-MAG welding with high power fiber laser. During the work there was fulfilled a mathematical simulation of the weld formation process at laser-arc welding. Also there was analyzed dynamic behavior of the melting pool that defines the weld quality in many respects. By simulating the process the authors were succeeded in finding ranges of parameters of the melting pool and the welding process that allow essentially reducing a volume of the technological experiments.

ALUMINUM ALLOYS. HIGH-STRENGTH STEELS. LASER WELDING. LASER-ARC WELDING

Frolov V. Y., Smirnova E. A., Yushin B. A. APPLICATION OF ACCELERATED INDUCTION HEATING FOR IMPROVEMENT OF PERFORMANCE PROPERTIES OF PLASMA COATINGS

The way to improve the running ability of self-fluxing coatings with high-frequency induction heat treatment is submitted. The investigative research of effects taking place by the induction heat treatment of multilayer materials is described. The results of laboratory research of coatings after induction heat treatment and mathematic simulation of treatment process are presented.

INDUCTION HEATING, HIGH FREQUENCY TREATMENT, COATING TREATMENT, RUNNING ABILITIES IMPROVEMENT, PLASMA COATINGS, SELF-FLUXING COATINGS, MULTILAYER MATERIALS INDUCTION HEATING, MATHEMATIC SIMULATION OF HEATING PROCESS

Radkevich M. M., Novikov A. I., Fomin D. U. STEEL STRUCTURE FORMATION UNDER THE CONDITIONS OF PROGRAMMED MECHANICAL THERMAL PROCESSING.

The questions of the substructural steels' state formation under combined strengthening treatment method - programmed mechanical thermal processing (PMTP) were considered. An attempt to explain the possibility and conditions for obtaining a homogeneous substructure, more homogeneous and equiaxed steels' microstructure as a result of PMTP was made. Conditions of PMTP mode selection providing a higher complex of steel products' mechanical properties were shown.

PROGRAMMED MECHANICAL THERMAL PROCESSING. STEEL STRUCTURE. DISLOCATION. RECRYSTALLIZATION. STRENGTHENING. MECHANICAL PROPERTIES

Ivankov S. A., Bashkarev A. J. ABOUT THE FATIGUE LIFE AND STRENGTH OF COMPOSITES.

In the present paper shows how to obtain numerical values of key parameters (u and γ), that are needed to determine the fatigue life of adhesive compound. The method is based on a study of technological modes of application of antifriction polyamide coating.

THERMOFLUCTUATIONAL THEORY OF STRENGTH. FATIGUE LIFE OF COMPOUND. ANTIFRICTION POLYAMIDE COATING.

Sokolov S. A., Grachev A. A. BUCKLING OF A PLATE WITH A RIGIDITY EDGE

Buckling of rectangular plates is considered by the supported one or two longitudinal edges of rigidity at various kinds of normal pressure. Recommendations are made according to factor of a stock of stability of the considered plates with edges.

PLATE. NORMAL PRESSURE. STABILITY. CRITICAL PRESSURE. OPTIMUM EDGE OF RIGIDITY.

Arefiev N. V., Badenko V. L., Latyshev N. K. GEOECOLOGICAL APPROACHES TO DESIGN OF INFORMATION-ANALYTICAL SYSTEMS FOR HYDROMELIORATIVE BUILDING AND DEVELOPMENT OF NATURE.

Experience of design of geoinformation analytical decision support systems in area of hydromeliorative building and development of nature is generalized. The general principles which concern all kinds of development of nature are formulated. The formulated methodological approaches have been used in the project for decision support system for an etalon natural-agricultural geosystem in Leningrad region.

GEOECOLOGY. MODELING. GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS. NATURAL-AGRICULTURAL GEOSYSTEM.

Gorbovskaya A. D., Bachmetova K. A., Matinyan N. N. ECOLOGICAL STATE OF THE SOILS OF THE SANCTUARY LAMMIN-SUO.

The paper is devoted to the use of the physico-chemical and biological methods investigation ecological state of the soils of the regional sanctuary Lammin-Suo.

SOIL COVER. ECOLOGY. ANTHROPOGENOUS FACTORS. TYPE OF SOILS. PHYSICAL AND CHEMICAL. BIOLOGICAL PROPERTIES

Markelova E. A. EXPERIMENTAL STUDY OF OIL SPILLS' BIODESTRUCTION IN MARINE ENVIRONMENT.

The research is dedicated to experimental study of hydraulics characteristics of bioabsorbents and solving turbulent diffusion equations of bioabsorbent's particles movement. The research data helps to predict biodestruction time period changing in dependence on economic usage of bioabsorbent, water depth and other factors of turbulence.

TURBULENT DIFFUSION. OIL SPILLS. BIOABSORBENTS. PARTICLE'S MOVEMENT

Strelets K. I. ABOUT DUST PARTICLES CHARACTERISTICS FOR ESTIMATION CYCLONES

The work is devoted to the determination of the dust particles features used for the estimation of the efficiency of gas purification from the dust particles in the cyclones. It's presented using hydraulic size instead of geometric diameter. The ways to theoretical and experimental measurements of it and the way of using it for are presented estimation of the efficiency of gas purification from the dust particles in the cyclones.

CYCLONE. GRAVITATION HYDRAULIC SIZE. CENTRIFUGAL HYDRAULIC SIZE.

Romanchenko O. V. GEODETIC MAINTENANCE OF BUILDING PROJECT.

In article are considered key theoretical and a number of methodical approaches to geodetic maintenance of building projects. The place and a role of geodetic projects in uniform process of the organisation of working out of ground plans are defined.

BUILDING ECONOMY. GEODETIC WORK

Tedeev T. R., Rutkovsky A. L. TO THE QUESTION OF EXPEDIENT REDISTRIBUTION OF CONTACT PRESSURE.

Results of calculation of a modeling problem of interaction of designs with the elastic basis are presented. It is shown that contact pressure are expedient for redistributing so that the greatest values have been concentrated in the central part of a contact surface that will essentially lower the bending moments and cross-section efforts in settlement sections.

METHOD OF FINAL ELEMENTS. THE CONTACT PRESSURE. THE STRUCTURALLY-UNSTABLE ENVIRONMENT. THE IS INTENSE-DEFORMED CONDITION

Syrov A. A., Hramov A. B. CRITERIA OF THE ESTIMATION OF ADVERSE CONSEQUENCES OF RADIATING FAILURES

Modern approaches to an estimation of possible consequences of radiating failures are considered. Criteria of an estimation on the international scale INES allowing in more details to consider adverse consequences of radiating failures are offered.

RADIATING FAILURE. NUCLEAR POWER INSTALLATION. DISTRICT INFECTION. POLLUTION STAIN

Gumenyuk V. I., Hramov A. B. PROBLEMS OF THE ACCOUNT OF THE FULFILLED NUCLEAR FUEL (ОЯТ) TRANSPORT INSTALLATIONS

Modern problems of the account of the fulfilled nuclear fuel of transport installations of the military ships and civil courts are considered. Measures on ordering of the account and storage of split materials are offered.

THE FULFILLED NUCLEAR FUEL. NUCLEAR MATERIALS. ACCOUNT РАДИОКТИВНЫХ OF SUBSTANCES. TRANSPORT INSTALLATIONS. RADIATING SAFETY

Tumanov A. J., Domakov V. V., Kondratyev V. G. DANGEROUS TECHNOGENIC FACTORS OF INFLUENCE AND THE REQUIREMENT SHOWN TO PROTECTION OF POWER ECONOMIC OBJECTS.

The detailed characteristic of the basic technogenic factors of influences is given. Requirements shown to protection of power economic objects are formulated. Set of the determined and stochastic factors of influence on power objects is defined and considered.

AMAZING FACTORS. POWER ECONOMIC OBJECT. TECHNOGENIC FACTORS. CLASSIFICATION. SECURITY MAINTENANCE

Atoyan G. L., Kondratyev V. G. INVARIANCE OF PRINCIPLES OF SECURING ENERGY OBJECTS OF NATIONAL ECONOMY FROM INFLUENCE OF THE AGGRESSIVE CHANGING ENVIRONMENT.

The set of principles of the system analysis is considered for realization of organizational design of independent control and protection systems of power plants from influence of the aggressive changing environment.

SYSTEM ANALYSIS. AGGRESSIVE ENVIRONMENT. PROTECTION. ORGANIZATIONAL DESIGN. STRUCTURALLY SYSTEM PRINCIPLE OF PROTECTION

Solovej K. S., Kondratyev V. G. THE ANALYSIS OF METHODS OF PROTECTION OF POWER ECONOMIC OBJECTS AT CHANGE OF INTERNAL AND EXTERNAL INFLUENCES.

The analysis of methods of protection of power economic objects in the changing environment of managing is carried out. Four basic directions of perfection of structurization for maintenance of protection of power objects are presented.

STRUCTURIZATION METHODS. POWER OBJECTS. CRITERIA OF EFFICIENCY. CONTROL SYSTEM OF PROTECTION. THE SYSTEM APPROACH

Ivanova T. Y. APPLICATION OF PROBLEMS OF MATHEMATICAL PROGRAMMING AT THE DECISION OF PROBLEMS OF MANAGEMENT IN EMERGENCY SITUATIONS.

In article application of problems of mathematical programming is considered at the decision of problems of management in emergency situations. The special attention is given a question of planning of necessary forces and means at liquidation of emergency floods of oil.

MANAGEMENT. THE EMERGENCY SITUATION. PROGRAMMING. OIL. THE TECHNIQUE

Akulov A. Y., Ivanov V. A., Aksonov A. V. FIREPROOF COVERING ON THE BASIS OF MINERAL HEAT-RESISTANT FILLERS FOR METAL DESIGNS.

Necessity of development of fireproof compound on the basis of mineral fillers for fire protection of metal designs in oil-and-gas branch is given in this work. The basic physical and mechanical properties and fire resistance are determined. The technique of designing of fireproof compounds on the basis of mineral heat-resistant fillers is determined.

FIRE RESISTANCE. FIREPROOF COMPOUND. NON-SWELLING AND SWELLING COMPOUNDS. MINERAL HEAT-RESISTANT FILLERS. A TECHNIQUE OF DESIGNING OF COMPOUNDS

Barakovskih S. A., Ivanov V. A., Plotnikov S. A. DEVELOPMENT OF DEVICE FOR PREVENTION OF FIRE SPREAD ON OIL AND GAS INDUSTRY.

Dependences of heat and fizical propekties of construction are probed taking in a thermal radiation at fires on objects of oil and gas industry, experimentally-searshing and theoretical job performances at development of fireproof constructions.

THERMAL STREAM. AIRILY-MECHANICAL SUDS. FIREPROOF CONSTRUCTION. HEAT CONDUCTIRITY. CLOSENESS. HEAT CAPACITY.

Rudskoy A. I., Kolbasnikov N. G., Zotov O. G., Lookianov A. A. COMPUTER SIMULATION OF IMPACT STRENGTH TEST. TEMPERATURE DEPENDENCE OF IMPACT STRENGTH.

The calculations of impact strength's temperature dependence were performed on samples of several steel grades and compared calculated and actual data. It was shown, that during plastic deformation in impact strength test, the rheological equation of material is considerably changes, that depends, obviously, on structures and deformation's mechanism changes. The relations, describing dependence of impact strength and temperature, have been obtained.

IMPACT STRENGTH. FINITE ELEMENT METHOD. COMPUTER MODEL. TEMPERATURE DEPENDENCE. RHEOLOGICAL EQUATION. EXTREME STRAIN

Gryaznov N. A., Kirichenko V. V., Kochkarev D. A., Lopota A. V. COMPLEXING SENSOR MEANS OF ROBOTIC PLATFORMS FOR LOCOMOTION AND MANIPULATION.

Analysis of bionic approach to the problem of environment perception resulted in the idea to separate technical vision from optical distant touching. Advantages of using laser-TV triangular shape-measuring system allow to consider it as the promising technique for distant touching function realization. Complexing of sensor means, ensuring technical vision and touching is considered for autonomous and partly autonomous mobile platforms and manipulators.

SHAPE MEASUREMENT. DISTANT TOUCHING. LASER STRUCTURED LIGHTING. MOBILE PLATFORM. TV CAMERA. SENSOR COMPLEXING

Ptitsyna L. K., Ptitsyn A. V. DEFINITION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE DISTRIBUTED SYSTEMS OF PROTECTION OF THE INFORMATION.

Typical receptions complexed program are considered and hardware of protection of the information, the expanded basis of models complexed is formed, analytical parities for definition of average times of protection of the information at the distributed data processing of united means are deduced.

INFORMATION PROTECTION. COMPLEXED PROGRAM AND THE HARDWARE. THE DISTRIBUTED SYSTEM. MODELS COMPLEXED. DYNAMIC CHARACTERISTICS

Rozin L. A., Lukashevich A. A. THE NUMERICAL DECISION OF CONTACT PROBLEMS WITH FRICTION UNDER THE DYNAMIC LOADS.

The numerical approach to the decision of dynamic contact problems under Culon's friction is offered. The decision is formulated on the basis of step-by-step modelling (in time) method with use of frame contact finite elements. The reduced algorithm is illustrated by numerical example.

CONTACT PROBLEM. CULON'S FRICTION. STEP-BY-STEP MODELLING. CONTACT ELEMENT

Volnov I. N., Nagorniy V. S. MODELING OF THE PROCESSES OF RECEIVING MONODISPERSE STREAMS OF WORKING LIQUIDS JETS IN ELECTRO DROPLET-JET TECHNOLOGIES.

Numerical modelling of a problem concerning formation of a monodisperse stream of drops at imposing on a working liquid of the harmonious compelled indignations from the piezoelectric converter is considered. The method of numerical solution of a mathematical model of the process in FLOW-3D program is described in details. The comparison of modelling and natural experiment results is performed.

JET. MONODISPERSE STREAM OF DROPS. NUMERICAL CALCULATION

Soldatova K. V., UNIVERSAL K. V. MODELING METHOD LOSS AND WORK INPUT MODELS VERIFICATION ON RESULTS OF INDUSTRIAL COMPRESSORS TEST.

Under the projects executed by the Method of universal modeling it is let out more than 35 types of industrial centrifugal compressors. The gas dynamic characteristics of 16 compressors received at production tests, are compared with the design. After specification of empirical factors, characteristics are modelled in all working range with the big accuracy. Characteristics of 81 steps which are a part of compressors are included in a databank for use by working out of new projects.

THE METHOD OF UNIVERSAL MODELLING. EMPIRICAL FACTORS. CENTRIFUGAL COMPRESSORS. MODELLING STEPS

Frolov V. Ya., Lopota A. V., Zverev S. G., Ivanov D. V. SIMULATION OF EVAPORATION FINE POWDER IN THE PLASMA JET FOR NANOMATERIALS.

This work is devoted to investigating the behavior of small particles in the plasma and includes: study of the dynamics of particle motion in plasma (the calculation of the trajectory and velocity of the particle); study of heat and evaporate the particles in the plasma (the calculation of temperature and particle mass). The proposed method allows the best way to assess modes of evaporation fine powder in the plasma jet in plasma and find the optimal operating parameters of the installation that affect the quality of the nanodioxide titanium and performance.

RF PLASMA. PLASMA TORCH. NANOMATERIALS. NANOPOWDER. TITANIUM DIOXIDE

Frolov V. Ya., Lopota A. V., Petrov G. K., Ivanov D. V. DEVELOPMENT OF DC ARC PLASMA TORCH FOR INDUCTIVELY COUPLED PLASMA INITIALIZATION.

The article contains results of numerical simulation of plasma processes in the DC arc plasma torch, analysis of those results that provides the choice of parameters of DC arc plasma torch design, results of experimental investigations of the torch parameters that control the length of the plasma jet. The obtained results can be used by specialists in the field of plasma technology for the development of plasma equipment for nanomaterials production.

PLASMA TECHNOLOGIES. NANOPOWDERS. TITANIUM DIOXIDE. ARC PLASMA TORCH. PLASMA JET

Sikoev Z. H., Asfondijarova I. V. MODERN METHODS OF RESEARCH OF QUALITY AND CONSUMER PROPERTIES OF VEGETABLE OILS.

Different methods of quality inspection of vegetable oils available on the Russian market are executed and described. Comparative and prognostic estimation of development of modern analytical research methods is given. Benefits and perspectives of the quality control methods is described.

INFRA-RED SPECTROSCOPY. ELETRO-PHYSICAL METHODS OF INVESTIGATION. QUALITY OF OILS

Martsenyuk M. A., Sivkov V. G., Sklyarenko M. S. EXPERIMENTAL STUDY OF OSCILLATORY CIRCUIT IN MODERN PHYSICS LABORATORY.

The current flowing in electric circuit is not accessible for direct observations. However the modern computer technique allows to overcome the difficulties. For visualization of currents and qualitative observations of current flowing in circuits *RC* and *RL* utilization of incandescent lamp is proposed. For quantitative (numerical) interpretations of observations high-speed photo camera was used and dependence between brightness of incandescent lamp and current value was determined. For vivid explanation of distinctive features of current flow in circuits *RC* and *RL* new mechanical models are proposed that are more appropriate for this purpose and for interpretation of oscillatory circuit which is the subject of the following study.

OSCILLATORY CONTOUR. TRAINING. PHOTOGRAPHING. COMPUTER METHODS

Kolbasnikov N. G., Zotov O. G., Lukyanov A. A. MATHEMATICAL MODELING OF DROP WEIGHT TEAR TESTING AND FRACTURE TOUGHNESS OF STEELS.

Licensed computer program ANSYS/Ls-Dyna, assigned for modeling of high-speed processes, is used for creating model of DWTT, which allow appreciate percentage of fracture toughness in break in present study. Computer experiment is made for finding correlation between fracture toughness and mechanical properties and structure inhomogeneity of metall. Analysis of results show, that in pipe steels values of fracture toughness, in general, are finding by ferritic properties. It is shown, that together with established patterns, random factor could have material effect on fracture toughness, for example, presence of «vulnerability» in the form of high-energy grain boundaries.

COMPUTER MODEL. DWTT. FRACTURE TOUGHNESS. MECHANICAL PROPERTIES. STRUCTURE

Kosmach V. F. THE QUANTUM ORBITS of PLANETS of SOLAR SYSTEM.

The kvantovo-mechanical method of the analysis of system of planets of the sun is offered.

QUANTUM -MECHANICAL METHOD. SYSTEM OF PLANETS SUN

Baranova I. I. TESTING IN THE SYSTEM OF CONTROL IN RUSSIAN AS A FOREIGN LANGUAGE.

The article is devoted to the problems of testing as a part of the system of control foreign students' communicative competence in social-cultural field of communication for different levels. Each level is characterized by certain skills and practical communicative objectives in different areas of activity. The article describes Russian Grammar aspects traditionally difficult for the foreigners studying Russian language.

RUSSIAN AS A FOREIGN LANGUAGE. THE SYSTEM OF CONTROL. TESTING AS A FORM OF CONTROL

Afanas'eva I. B. FORMATION OF INTELLECTUAL SKILLS IN TRAINING.

The paper describes theoretical and methodical basis of formation of intellectual skills in training. Within the limits of developed technology of training the geometrical and educational problems, the general and specific receptions of educational activity are allocated.

INTELLECTUAL SKILLS. TECHNOLOGY OF TRAINING. EDUCATIONAL ACTIVITY

Tuchkevich E. I. TECHNOLOGY OF FORMING CORE PROFESSIONAL COMPETENCIES OF MASTERS EDUCATED IN PROFESSIONAL PROGRAM «DESIGN».

Elaboration in Saint-Petersburg State Polytechnic University of new pedagogical technology for forming core professional competencies in accordance with Federal State Educational Standard in Higher Professional Education supposes achievement of targets and results of learning the discipline «Computer design» accented by clear priority of activity component: forming in masters educated within professional program 072500 «Design» the knack to solve generalized professional tasks, appropriate professional behavior and necessary for all this knowledge and understanding, ability and practice, skill, enabling the graduates of this program to demonstrate their core professional competencies PC-1 – PC-7, PC-10 in accordance with Federal State Educational Standard in Higher Professional Education

COMPETENCY. COMPETENCY BUILDING APPROACH. FEDERAL STATE EDUCATIONAL STANDARD IN HIGHER PROFESSIONAL EDUCATION. CORE PROFESSIONAL COMPETENCIES. LEARNING TECHNOLOGY

Korneev V. G. COMMENTARIES ON THE PAPER BY M.V. KOVTUN, O.P. RODIONOVA AND S.V. LUPULIAK «FAST ALGORITHM OF SOLUTION OF SOME CONTACT PROBLEMS IN MECHANICS».

In the paper of V.G. Korneev, the numerical method for solving contact problems, suggested by M.V. Kovtun, O.P. Rodionova and S.V. Lupuliak (2009), is considered. It is shown that suggestions of the authors are based on the false prerequisites, and the «method» does not make sense in the cases of contacts of linear elastic bodies of two and three dimensions or contacts of such bodies with obstacles. Computational costs of some algorithms used in the computer codes for solution of contact problems and numerical experiments are also discussed.

NUMERICAL METHODS. CONTACT PROBLEMS. FAST ALGORITHMS

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГУ

№ 4 (110) 2010

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. Типцовой*

Директор Издательства Политехнического университета *А.В. Иванов*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 27.12.2010. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 49,75. Уч.-изд. л. 49,75. Тираж 1000. Заказ 502.

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 научным направлениям: Экономика, Управление, Информатика, Вычислительная техника, Физика, Энергетика, Машиностроение, Металлургия, Радиотехника и связь, Электроника, Измерительная техника.

В соответствии с решением Президиума ВАК от 24 ноября 2009 года журнал прошел перерегистрацию на 2010 год. Периодичность выхода журнала — 4 номера в год.

Научные направления серии «Наука и образование», учитываемые ВАК Минобрнауки РФ при защите докторских и кандидатских диссертаций в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников: Энергетика, Машиностроение, Металлургия.

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, аспирантов, соискателей ученой степени кандидата наук, как правило, 8–15 страниц формата А-4. Количество рисунков и фотографий не должно превышать 3, таблиц — 2, литературных источников — 10.

3. Авторы должны придерживаться следующей обобщенной структуры статьи: вводная часть (актуальность, существующие проблемы — объем 0,5–1 стр.); основная часть (постановка и описание задачи, изложение и суть основных результатов); заключительная часть (предложения, выводы — объем 0,5–1 стр.); список литературы.

4. Число авторов статьи — не более трех человек.

5. Набор текста осуществляется в редакторе MS Word, формул — в редакторе MS Equation. Таблицы набираются в том же формате, что и основной текст.

Шрифт — TNr, кегль шрифта основного текста — 14, интервал — 1,5. Таблицы большого размера могут быть набраны 12 кеглем. Параметры страницы: поля слева 3 см, сверху, снизу 2,5 см, справа 2 см. Текст размещается без переносов. Абзацный отступ — 1 см.

6. Рисунки, таблицы, фотографии размещаются по тексту статьи.

2.2. Представление материалов

Вместе с материалами статьи в редакцию должны быть обязательно представлены:

- номер УДК в соответствии с классификатором (в заголовке статьи);
- аннотация статьи (2–3 предложения) на русском и английском языках;
- ключевые слова статьи (5–7 слов) на русском и английском языках;
- сведения об авторах: ФИО, место работы, рабочий телефон, должность, ученое звание, ученая степень, контактный телефон, e-mail;
- рекомендация на имя заместителя главного редактора журнала, подписанная научным руководителем автора и/или руководителем структурного подразделения. Рекомендация должна быть ОБЯЗАТЕЛЬНО заверена в отделе кадров;
- рецензия на имя заместителя главного редактора, подписанная специалистом, имеющим ученую степень доктора наук и/или ученое звание профессора. Рецензия должна быть ОБЯЗАТЕЛЬНО заверена в отделе кадров. Рецензент несет ответственность за содержание статьи, достоверность представленных материалов.

При необходимости редколлегия может потребовать представления акта экспертизы.

Все материалы должны быть представлены по электронной почте: e-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

2.3. Рассмотрение материалов

Представленные в редакцию 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