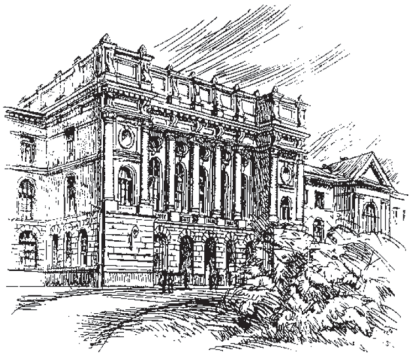
Том 25, №3, 2019



Научно-технические ведомости СПбПУ.

Естественные и инженерные науки

Санкт-Петербург

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбПУ. ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ НАУКИ

ST. PETERSBURG POLYTECHNIC UNIVERSITY
JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES AND TECHNOLOGY

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., главный редактор, научный руководитель СПбПУ, академик РАН

Вайсберг Л.А., академик РАН

Згуровский М.З., ин. член РАН, академик НАН Украины

Костюк В.В., академик РАН

Лагарьков А.Н., академик РАН

Окрепилов В.В., академик РАН

Патон Б.Е., академик НАН Украины и РАН

Рудской А.И., академик РАН

Федоров М.П., академик РАН

EDITORIAL COUNCIL

Vasiliev Yu.S. — head of the editorial council, full member of the Russian Academy of Sciences, Scientific director of the Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

Vaisberg L.A. — full member of the Russian Academy of Sciences

Zgurovskiy M.Z. — foreign member of the Russian Academy of Sciences, full member of the National Academy of Sciences of Ukraine

Kostiuk V.V. — full member of the Russian Academy of Sciences

Lagar'kov A.N. — full member of the Russian Academy of Sciences

Okrepilov V.A. — full member of the Russian Academy of Sciences

Paton B.E. — full member of the Russian Academy of Sciences and the National Academy of Sciences of Ukraine

Rudskoy A.I. — full member of the Russian Academy of Sciences

Fedorov M.P. — full member of the Russian Academy of Sciences

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., главный редактор, научный руководитель СПбПУ академик РАН

Кондратьев С.Ю., зам. главного редактора, д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Аксёнов Л.Б., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Башкарёв А.Я., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Гордеев С.К., д-р техн. наук, ст. научн. сотр. ЦНИИМ

Гуменюк В.И., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Забоин В.Н., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Колсун Михал, профессор Технического университета г. Кошице (Словакия)

Кириллов А.И., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Коровкин Н.В., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Митяков А.В., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Михайлов В.Г., д-р техн. наук, профессор Бранденбургского ТУ (Германия)

Райчик Ярослав, д-р техн. наук, профессор Ченстоховского политехнического университета (Польша)

Сергеев В.В., д-р техн. наук, профессор, проректор СПбПУ чл-корр РАН,

Тендлер М.Б., ин. член РАН, KTH Royal Institute of Technology (Швеция)

Титков В.В., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Толочко О.В., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Фокин Г.А., д-р техн. наук, генеральный директор ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург»

Цеменко В.Н., д-р техн. наук, зав. каф. СПбПУ

JOURNAL EDITORIAL BOARD

Vasiliev Yu.S. — editor-in-chief, full member of the Russian Academy of Sciences, Scientific director of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Kondrat'ev S.Yu. — deputy editor-in-chief, Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Aksenov L.B. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Bashkarev A.Ya. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Gordeev S.K. — Dr.Sc. (tech.), prof. CNIIM

Gumenyuk V.I. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Zaboin B.N. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Kolcun Michal — Ph.D., Technical University of Kosice (Slovak Republlc)

Kirillov A.I. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Korovkin N.V. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Mityakov A.V. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Michailov V.G. — Dr.Sc. (tech.), prof. BTU (Germania)

Raychik Ya. — Dr.Sc. (tech.), prof. Czestochova Polytecnic University (Poland)

Sergeev V.V. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU, corresponding member of the RAS

Tendler M.B. — foreign member of the Russian Academy of Sciences, KTH Royal Institute of Technology (Sweden)

Titkov V.V. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Tolochko O.V. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Fokin G.A. — Dr.Sc. (tech.), General Director of LLC «Gazprom Transgaz St. Petersburg»

Tsemenko V.N. — Dr.Sc. (tech.), Head of Chair SPbPU

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

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

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

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ПИ № ФС77-69285 от 6 апреля 2017 г.)

Подписной индекс **18390** в объединенном каталоге «Пресса России».

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

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции и издательства: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
Тел. редакции (812) 294-22-86.

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019

Содержание

Поздравление генерального директора-генерального конструктора ЗАО «Научно-производственное объединение специальных материалов» Михаила Владимировича Сильникова **5**

Энергетика и электротехника

Клименко В.В., Терешин А.Г., Федотова Е.В. Рост потенциала возобновляемых источников энергии в России в условиях глобального потепления 6

Гуменюк В.И., Туманов А.Ю., Атоян Г.Л. Атомная отрасль России: развитие в ногу со временем 28

Попов М.Г., Васильева О.А., Асаинов Д.Н. Опыт внедрения цифровых технологий на ТЭЦ на базе многофункциональных измерительных приборов 47

Калютик А.А., Трещев Д.А., Поздеева Д.Л. Утилизация твердых бытовых отходов на ТЭЦ г. Санкт-Петербурга 59

Машиностроение

Сильников М.В. Применение релаксационных систем для обеспечения безопасности 71

Хрусталева И.Н., Любомудров С.А. Ларионова Т.А., Толстолес А.А. Повышение эффективности технологической подготовки производства на судоремонтных предприятиях 86

Бусаров С.С., Аистов И.П., Титов Д.С. Верификация методики расчёта деформаций стенок цилиндра тихоходных длинноходовых бессмазочных поршневых агрегатов 97

Наумов А.В., Манжула К.П. Расчетно-экспериментальное исследование местной устойчивости коробчатых балок с криволинейными стенками 108

Металлургия и материаловедение

Стрижиус В.Е. Особенности диаграмм постоянной усталостной долговечности слоистых композитов . 120

Морачевский А.Г., Попович А.А. Магний-ионные аккумуляторы – новое направление исследований 133

Хроника

Морачевский А.Г. О истории химического факультета Политехнического института (1919–1930) 140

Contents

Congratulating Mikhail Vladimirovich Silnikov, General Director and General Designer of Special Materials Corp. **5**

Power engineering and Electrical engineering

Klimenko V.V., Tereshin A.G., Fedotova E.V. Increase in renewable energy potential in Russia due to global warming 6

Gumenyuk V.I., Toumanov A.Yu., Atoyan G.L. Atomic industry of Russia: keeping up with the times 28

Popov M.G., Vasilyeva O.A., Asainov D.N. Experience of introducing digital technologies based on multifunctional measuring meters at power station 47

Kalyutik A.A., Treshchev D.A., Pozdeeva D.L. Recycling municipal solid waste at power-and-heating plants of St. Petersburg 59

Mechanical engineering

Silnikov M.V. Application of relaxation systems for security 71

Khrustaleva I.N., Lyubomudrow S.A. Larionova T.A., Tolstoles A.A. Improving efficiency of technological preparation of production in ship repair company 86

Busarov S.S., Aistov I.P., Titov D.S. Verification of method for calculating deformations of cylinder walls of low-speed long-stroke oil-free piston units 97

Naumov A.V., Manzhula K.P. Experimental study of local buckling of box-shaped beams with non-linear walls 108

Metallurgy and Materials technology

Strizhius V.E. Constant-life diagrams of layered composites 120

Morachevskij A.G., Popovich A.A. Magnesium batteries: a new direction of research 133

Chronicle

Morachevskij A.G. History of the chemical faculty of the Polytechnical institute (1919–1930) 140

Поздравление генерального директора-генерального конструктора ЗАО «Научно-производственное объединение специальных материалов»

МИХАИЛА ВЛАДИМИРОВИЧА СИЛЬНИКОВА

Редакционный Совет и редакционная Коллегия журнала «Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки» поздравляют генерального директора-генерального конструктора ЗАО «Научно-производственное объединение Специальных материалов» Михаила Владимировича Сильникова – выпускника Ленинградского политехнического института им. М.И. Калинина 1985 года и члена Попечительского совета университета, который первым из Политехников был удостоен высокой правительственной награды Ордена Александра Невского.

DOI: 10.18721/JEST.25301
УДК 620.9

В.В. Клименко, А.Г. Терешин, Е.В. Федотова

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

РОСТ ПОТЕНЦИАЛА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В РОССИИ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Работа посвящена оценке изменений потенциала возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в условиях изменений климата на территории России. Приведены данные об истории, современном состоянии и перспективах развития ВИЭ в России. Показано, что в настоящее время, без учета крупных ГЭС, обеспечивающих около 6 % потребления первичной энергии в России, вклад остальных ВИЭ в энергетику страны составляет менее 2 %, и, при сохранении нынешних тенденций их развития, в ближайшие десятилетия не превысит 4 % суммарного энергопотребления. На основе данных расчетов на климатических моделях проекта CMIP5 с применением авторской методики формирования модельных ансамблей получены оценки изменения основных климатических параметров (температуры воздуха, количества осадков, скорости ветра) на территории России на период до 2070 г. для наиболее вероятного сценария антропогенного воздействия на глобальную климатическую систему RCP 4.5. Выполнены расчеты изменения прикладных климатических характеристик, определяющих потенциал ВИЭ – объема речного стока, ветропотенциала, биопродуктивности лесов. Показано, что на большей части территории страны эти изменения будут иметь благоприятный характер. Выполненное исследование показало, что суммарный ожидаемый положительный эффект (экономия органического топлива) от увеличения потенциала ВИЭ за счет климатических изменений на территории России на период до 2050 г. – более 10 млн т у.т., – с избытком компенсирует негативные последствия этих изменений для других отраслей энергетики.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, потенциал, изменения климата, модельные оценки, проект CMIP5, сценарий RCP4.5, речной сток, ветропотенциал, биопродуктивность лесов.

Ссылка при цитировании:
Клименко В.В., Терешин А.Г., Федотова Е.В. Рост потенциала возобновляемых источников энергии в России в условиях глобального потепления // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 3. С. 6–27. DOI: 10.18721/JEST.25301

V.V. Klimenko, A.G. Tereshin, E.V. Fedotova

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

INCREASE IN RENEWABLE ENERGY POTENTIAL IN RUSSIA DUE TO GLOBAL WARMING

This study presents the assessment of changes in potential renewable energy under climate changes over the Russian territory. The data are analyzed concerning the history, present state and prospects of development of renewable energy sources in Russia. We show that at present, excluding large hydropower plants, which supply about 6 % of primary energy consumption in Russia, the share of all the other renewables in national energy supply comprises less than 2 %, and, if present trends of their development continue in the coming decades,

will not exceed 4% of total energy consumption in Russia. Based on CMIP5 climate models simulations using original selection methodology, we estimated the changes of major climatic parameters (air temperature, precipitation, wind speed) over Russia for the period up to 2070 under the most likely future climate scenario RCP 4.5. The changes in the applied climatic characteristics that define the renewables potential, such as river runoff, wind potential, net primary production of forests are calculated. Results show that climate change has a positive impact on renewables potential over the most part of the country. It is also projected that the total positive impact (in terms of fossil fuel conservation) by increasing the renewable energy potential due to climatic changes over the Russian territory for the time frame up to 2050, exceeding 10 million tce, fully offsets the negative impact of these changes on other energy sub-sectors.

Keywords: renewable energy sources, potential, climate change, model estimates, CMIP5 project, RCP 4.5 scenario, river runoff, wind potential, net primary production of forests.

Citation:
V.V. Klimenko, A.G. Tereshin, E.V. Fedotova, Increase in renewable energy potential in Russia due to global warming, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 25 (03) (2019) 6–27. DOI: 10.18721/JEST.25301

Введение. Влияние наблюдающихся и ожидаемых изменений климата на различные отрасли экономики уже давно вызывает серьезную озабоченность мирового сообщества [1]. Россия, несмотря на то, что большая часть ее территории лежит в зоне особенно сильных изменений, занимает позицию скорее пассивного наблюдателя и еще не приступила к масштабным адаптационным мероприятиям [2].

Энергетика, основа современной экономики, также в значительной мере подвержена влиянию климатических изменений. Динамика таких климатических характеристик, как температура воздуха, количество осадков, скорость ветра, облачность, определяет уровни потребления различных видов энергии (например, тепла на отопление, электроэнергии на освещение и кондиционирование), потери при передаче и распределении, эффективность производства электроэнергии (тепловые циклы паровых и газовых турбинных установок) [3, 4].

Бурное распространение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в настоящее время в значительной мере определяет развитие мировой энергетики [5]. Согласно долгосрочным прогнозам, именно они в перспективе одного-двух десятилетий могут стать основой глобального энергетического комплекса. Поэтому неудивительно, что значительное число научных работ посвящено исследованию работы энергетических установок на ВИЭ в условиях меняющегося климата.

В России, богатой водными и лесными ресурсами, по понятным причинам основное внимание уделяется гидроэнергетике [6–10] и использованию биотоплива [11–14].

1. ВИЭ в России

Россия сильно отстает по темпам развития нетрадиционных ВИЭ (НВИЭ, без учета крупных ГЭС и дров для населения) от основных лидеров в этой области (Китай, ЕС, США и др.) [5, 15]. Сегодня основу отечественной энергетики составляет органическое топливо (86 % суммарного потребления первичной энергии в 2018 г., из которых 54 % приходится на природный газ), ГЭС и АЭС дают по 6 % общего энергопотребления, вклад НВИЭ составляет едва более 1 % (рис. 1, *а*). Для сравнения: доля НВИЭ в энергобалансе ЕС достигает 9,5 %, в Японии – 5,6, США – 4,5, Китае – 4,4 %.

Такая же структура энергоресурсов характерна и для электроэнергетики страны (рис. 1, *б*) – в 2018 г. на ТЭС, использующих органическое топливо, было произведено 65 % электроэнергии (в том числе 48 % – на газовых энергоблоках). Вклад АЭС и ГЭС составил 19 % и 17 % соответственно, а НВИЭ – лишь 0,6 %.

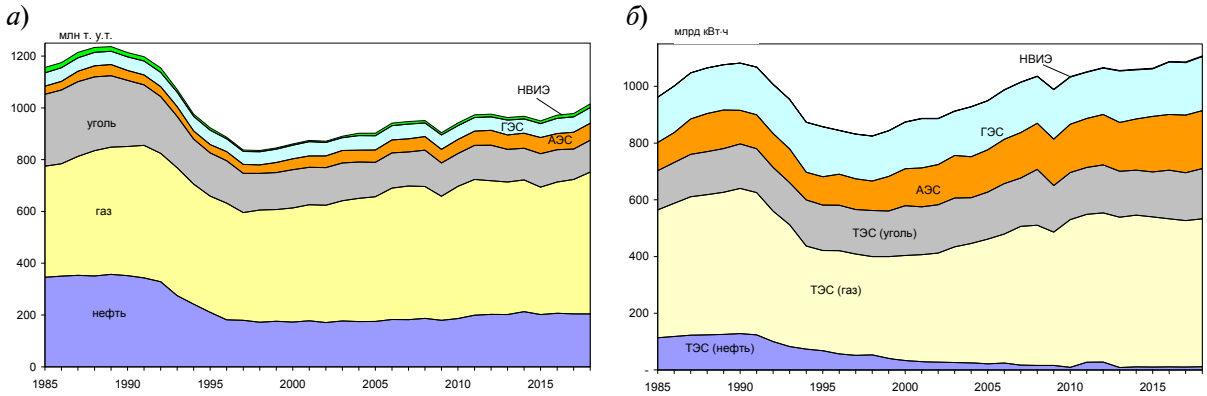


Рис. 1. Потребление первичной энергии (*а*) и производство электроэнергии (*б*) в России в 1985–2018 гг.

Fig. 1. Primary energy consumption (*а*) and electricity production (*б*) in Russia in 1985–2018

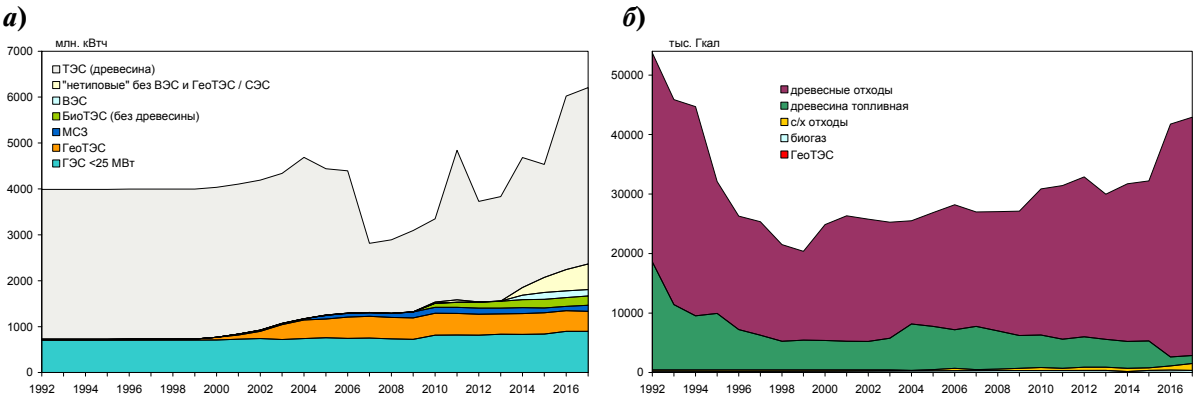


Рис. 2. Выработка электроэнергии и производство тепла (централизованное) из НВИЭ в России в 1992–2017 гг.

Fig. 2. Electricity and heat production (centralized) from renewable energy sources in Russia in 1992–2017

Только наличие значительного числа АЭС и крупных ГЭС, наряду с превалирующей долей природного газа в потреблении органического топлива, позволяет нашей стране сохранять некоторые важные экологические показатели энергетики (например, карбоноемкость) на уровне среднемировых [15].

Данные энергетической статистики (рис. 2) свидетельствуют о том, что основным ресурсом возобновляемой энергетики в настоящее время в России является биотопливо, обеспечивающее более половины выработки электроэнергии и 90 % централизованного тепла из ВИЭ (не считая дров для индивидуального печного отопления).

Однако развитие в последние годы ветровой и солнечной энергетики, а также действующие программы по увеличению их установленной мощности дают основание надеяться, что в ближайшие десятилетия их вклад заметно увеличится (табл. 1).

Характерной особенностью большинства ВИЭ является их сильная зависимость от природно-климатических параметров (объема речного стока для ГЭС, скорости ветра для ВЭС, облачности для СЭС, биопродуктивности для биотоплива).

Таблица 1

Структура потребления возобновляемых энергоресурсов в России, млн т у.т.

The structure of consumption of renewable energy resources in Russia, million tons of coal equivalent

Ресурсы	2000	2005	2010	2015	2020	2030	2050
Гидро (малые ГЭС)	0.227	0.242	0.261	0.267	0.3	0.3	0.4
Солнце	0.000	0.000	0.009	0.105	0.7	1.1	2
Ветер	0.001	0.002	0.001	0.047	0.7	2.4	8
Геотермальные	0.018	0.131	0.158	0.148	0.15	0.15	0.15
Биотопливо, в том числе	4.000	4.328	5.001	5.246	7	10	26
древесина	*3.929*	*4.248*	*4.860*	*5.099*	*7*	*10*	*26*
сельхозотходы	*0.036*	*0.036*	*0.084*	*0.071*			
биогаз	*0.035*	*0.044*	*0.057*	*0.075*			
НВИЭ, всего	**4.246**	**4.703**	**5.429**	**5.813**	**9**	**14**	**37**
Кроме того, дрова	***4.647***	***5.011***	***4.195***	***4.000***	***4***	***4***	***5***
Биоресурсы, всего	**8.647**	**9.339**	**9.196**	**9.246**	**11**	**14**	**31**

Источники. Росстат, Минэнерго, СО ЕЭС, расчеты авторов.

Поэтому для оценки эффективности их функционирования на длительную перспективу необходимы данные об изменениях климата в регионах их размещения.

2. Изменения климата на территории России

2.1. Методика получения прогнозных климатических оценок. Существуют две основные группы подходов к моделированию климата. Первая основана на применении методов математической статистики к данным метеорологических наблюдений. Исторически это наиболее развитый и проработанный подход. Одно из его главных преимуществ заключается в возможности учесть особенности реальных климатических процессов, зафиксированные в накопленном массиве эмпирических данных, такие как спектральные характеристики климатической изменчивости, сезонную динамику или величину реальных климатических норм. Основные ограничения этого подхода связаны с нестационарностью климатической системы, в первую очередь с возрастающим трендом температур, наблюдающимся на протяжении последнего столетия. Эта тенденция с очень высокой вероятностью продолжится, по крайней мере, в течение всего следующего столетия и неизбежно окажет влияние на все процессы в климатической системе. В результате экстраполяция статистических закономерностей, обнаруживавшихся на протяжении истории наблюдений (обычно это одно-два столетия), в будущее становится не вполне корректной [16].

Для климатических параметров с высокой естественной изменчивостью, таких как скорость ветра или количество осадков, разработка долгосрочных прогнозных оценок требует использования принципиально иных подходов, лежащих в основе второй группы климатических моделей и заключающихся в численном решении уравнений переноса для всей климатической системы. Идея гидродинамического моделирования атмосферных процессов возникла давно, практически одновременно со становлением гидродинамики как науки. Уже в начале двадцатого века обсуждалась принципиальная возможность получения метеорологических прогнозов с помощью гидродинамических моделей. Реализация этой идеи потребовала почти столетия фундаментальных исследований климатических процессов и совершенствования вычислительных методов.

Прорыв в вычислительной гидродинамике, произошедший около двадцати-тридцати лет назад обеспечил в том числе и возможность практического использования гидродинами-

ческих моделей для метеорологических и климатических задач. На сегодняшний день гидродинамическое моделирование стало ведущим подходом к исследованию климата как в прошлом, так и в будущем. Основная трудность этого метода заключается в неразрывной связи, существующей между климатическими процессами, протекающими на разных пространственных и временных масштабах. Климатические условия в конкретной географической локации определяются атмосферными процессами, протекающими на временных масштабах от многих десятилетий до нескольких минут. Включить их все в состав единственной модели было бы не только затруднительно технически, но и ошибочно методически. Расчётные исследования климата проводятся с использованием концепции вложенного моделирования, когда на относительно грубой сетке сначала проводится моделирование процессов переноса планетарного масштаба. Затем результаты этого глобального моделирования используются для постановки граничных условий в региональных климатических моделях, расчетная область которых ограничена некоторым выбранным регионом, но представлена с высоким пространственным разрешением. При необходимости данные регионального климатического моделирования используются в специальных узкоспециализированных моделях, обеспечивающих представление единственного параметра или процесса с точностью, достаточной для непосредственного практического применения, – к примеру, в моделях формирования речного стока.

Классическим подходом к снижению вычислительного погрешности гидродинамических климатических моделей является использование ансамблевого осреднения. Суть этого подхода заключается в использовании для прогнозной оценки нескольких независимых моделей, что позволяет снизить погрешности, связанные с несовершенством представлений о природе климата и вычислительных погрешностей, заложенных в каждую из них.

Прорывным подходом к моделированию климата стала координация усилий разных модельных групп, направленная на сопоставление результатов разных моделей в рамках одного проекта и получении ансамблевых оценок климатических параметров на основе совместного использования лучших климатических моделей. Крупнейшей инициативой такого рода стал Проект межмодельного сопоставления сопряжённых климатических моделей (CMIP). Результаты современной, пятой, фазы этого проекта обеспечивают достаточно высокое качество воспроизведения основных климатических параметров по территории России [2]. На сегодняшний день идет формирование модельного архива следующей, шестой, фазы проекта CMIP и начинается планирование седьмой. Однако, до сих пор наиболее обширная база данных модельных оценок доступна для проекта CMIP5.

Настоящая работа направлена на оценку крупномасштабных тенденций изменений климата, существенных для развития энергетики, по всей территории России на протяжении XXI в. Учитывая субконтинентальный масштаб задачи и соображения однородности используемых модельных методов, мы приняли решение использовать результаты глобального климатического моделирования для непосредственной разработки прогнозных оценок.

Результаты архива CMIP5, доступ к которому был любезно предоставлен Немецким климатическим расчетным центром (DKRZ), для выбранных климатических параметров и сценариев были организованы в локальную базу данных. Обработка этой базы данных была выполнена с помощью специально разработанного авторского программного комплекса на языке R [17]. Доступ к исходному коду этого комплекса организован на условиях свободной лицензии GPL v3.0 в репозитории https://github.com/ekatef/CMIP5-ArAvr. Список моделей, использованных в наших расчётах, приведён в таблице Приложения.

2.2. Модельные оценки основных климатических параметров на территории России в XXI веке. Прогнозные оценки температуры и количества осадков выполнены с использованием всех доступных для выбранного сценария моделей. Для оценок скорости ветра на основе проведенной процедуры валидации использованы модели, обеспечивающие наилучшее качество распределения ветрового режима на территории России. Кроме того, было выполнено специальное исследование устойчивости полученной прогнозной оценки к составу ансамбля и выбранному климатическому сценарию. Подробно методика проведенных расчетов представлена в [29].

В настоящей работе были рассмотрены следующие основные климатические параметры, влияющие на условия развития возобновляемой энергетики: температура воздуха, количество осадков и скорость ветра. Результаты выполненных оценок для середины и второй половины XXI в. для климатического сценария rcp 4.5, который, на наш взгляд, будет достаточно близко соответствовать температурному режиму для этого периода [15, 33], представлены на рис. 3.

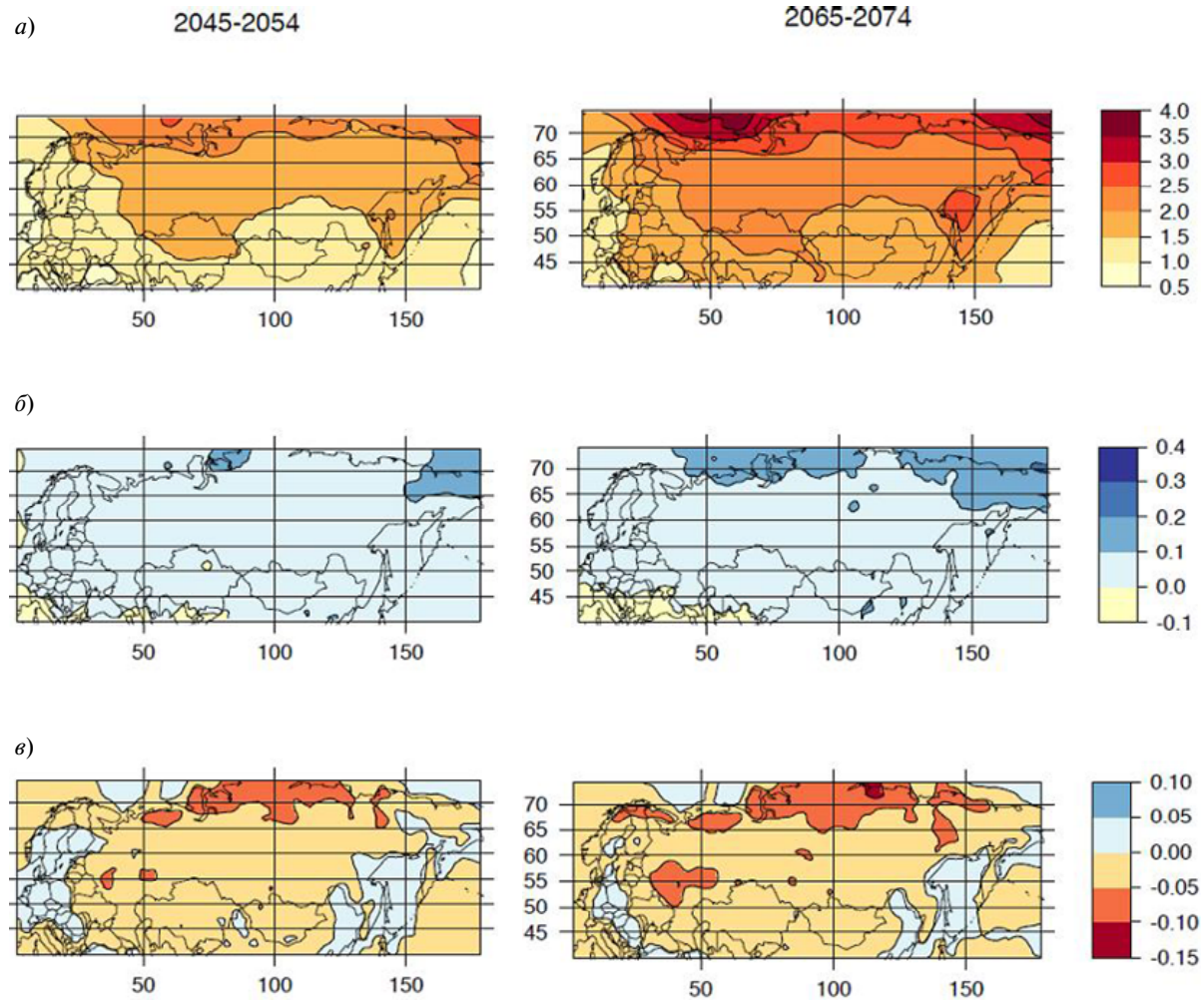


Рис. 3. Ансамблевые оценки для изменения среднегодовых значений основных климатических параметров на территории России в 2045–2054 и в 2065–74 (по сравнению с 2007–2016): *а* – изменение температуры воздуха (°C); *б* – относительное изменение количества осадков; *в* – относительное изменение скорости ветра

Fig. 3. Ensemble estimates for changing the average annual values of the key climatic parameters on the territory of Russia in 2045–2054 and in 2065–74 (compared with 2007–2016): *a* – change in air temperature (°C); *б* – relative change in rainfall; *в* – relative change in wind speed

Характерная особенность современных изменений температуры заключается в их значительной пространственной и сезонной неравномерности. Ярким проявлением пространственной неоднородности является т. н. арктическая амплификация, которая заключается в ускоренном повышении температур в субарктических регионах по сравнению с остальной частью планеты. Иными словами, Россия принадлежит к регионам мира, где современное потепление климата особенно явно выражено (рис. 3, *а*). Если повышение среднеглобальной температуры к 2070 г. по отношению к первому десятилетию XXI века при развитии событий по сценарию rcp 4.5 составит менее 1,5 °C, то на большей части территории России можно ожидать повышения среднегодовой температуры в пределах 2–3 °C. Сезонная неравномерность заключается в неравномерном изменении температуры по сезонам. Известно, например, что если в Западной Европе стремительно теплеют летние месяцы, то в России потепление происходит главным образом зимой и весной.

Для режима осадков увеличение среднеглобальной температуры в соответствии с уравнением Клапейрона-Клаузиуса означает повышение содержание влаги в атмосфере и, как следствие, интенсификацию глобального гидрологического цикла. В результате увеличивается количество осадков в регионах с достаточным увлажнением, а в засушливых регионах происходит дальнейшее иссушение. Этот характер пространственных изменений описывается ставшей классической формулой «wet getting wetter». Еще одна характерная черта современных гидрологических изменений заключается в изменении интенсивности осадков: в регионах, обнаруживающих тенденцию к повышению увлажнения, возрастает доля осадков, выпадающих в виде ливней. В целом, практически вся территория России попадает в зону, где вероятно повышение среднегодового количества осадков (рис. 3, *б*). Снижения увлажнения следует опасаться только в самой южной части страны.

Изменение приповерхностной скорости ветра – т. е. скорости, соответствующей высотам в 10–100 м – в целом по Северному полушарию в последние десятилетия имеет тенденцию к снижению над континентами и увеличению над поверхностью океана. Вопрос о влиянии естественной климатической изменчивости на наблюдаемый сдвиг ветрового режима до сих пор не имеет однозначного ответа. Несомненно, однако, что направленные изменения климата вносят свой вклад в этот процесс [29]. Существующие прогнозные оценки для изменения ветрового режима отличаются некоторой противоречивостью. Это связано с высокой естественной изменчивостью скорости ветра, не всегда корректным выбором модельных сценариев и особенностями воспроизведения ветрового режима глобальными климатическими моделями [19].

Для России наиболее детальные оценки изменения скорости ветра были выполнены в составе комплексного климатического исследования Главной геофизической обсерватории им. Воейкова [20]. В этих расчетах авторы использовали результаты CMIP5 для сценария rcp 4.5, проведя валидацию глобальных климатических моделей и выбрав те шестнадцать из них, которые наилучшим образом воспроизводят сезонные колебания температуры и осадков. Расчетные изменения скорости ветра составили при этом до +/–1 м/с. Считая это изменение незначительным, авторы воздержались от подробного анализа полученного результата. Между тем, для приповерхностной скорости ветра на территории России величины в 1 м/с порой означают относительное изменение скорости ветра на треть, что способно повлечь за собой изменение выработки ветроустановок почти на порядок.

Выполненные нами оценки (рис. 3, *в*) использовали ту же методику, что [20], с тем отличием, что валидация моделей проводилась по качеству воспроизведения ими ветрового режима в Северной Евразии [19]. Достоверность полученных оценок обеспечивалась сопоставлением разных вариантов мультимодельного ансамбля. В результате было обнаружено, что в XXI-м столетии над территорией России формируется характерная полярная структура поля изменения приповерхностной скорости ветра. Если в западной части страны скорость ветра несколько снижается, то в Восточной Сибири и Приморье формируется область повышенных скоростей. Этот эффект, по-видимому, связан со сдвигом атмосферной циркуляции, в частности, с ослаблением Сибирского антициклона и активизацией циклонической деятельности над Тихим океаном, наблюдавшейся в последние десятилетия и связываемой обычно с современным изменением климата. Этот качественный результат удивительно стабилен во всех рассматриваемых ансамблях и, более того, нечувствителен к выбору климатического сценария. Одну и ту же картину увеличения скорости ветра на юге Дальнего Востока мы получили и для оптимистического сценария rcp 2.6, и для драматического rcp 8.5.

3. ГЭС

В России в конце 2010-х гг. ГЭС производят примерно 17 % общенациональной выработки электроэнергии, обладают 21 % общей установленной мощности электростанций России и представляют собой наиболее развитую область возобновляемой энергетики.

Влияние на работу российских ГЭС изменений климата в последние десятилетия уже стало заметным, хотя выражается оно пока, в основном, в перераспределении речного стока по сезонам. Более теплые зимы на территории России приводят к смещению сроков половодья и более плавному его протеканию. Увеличение количества выпадающих летом осадков во многих регионах приводит к увеличению летнего стока. В результате распределение стока становится более равномерным по сезонам, что уже сегодня приходится учитывать при управлении режимами крупных гидрокаскадов.

Что касается изменения величины речного стока, оценка долговременных изменений его изменений осложняется наличием многолетних фаз снижения и повышения водности, связанных в первую очередь с вариациями глобальной атмосферной циркуляции [21]. Наличие этой долгопериодической компоненты в сочетании со стохастической природой формирования речного стока определяют сложность оценки связи речного стока с изменениями климата и приводят к необходимости более детальных исследований.

Динамика речного стока и связанного с ним гидроэнергетического потенциала определяется изменением двух основных климатических факторов: температуры воздуха и количества осадков, влияющих на процесс формирования речного стока для территории России противоположным образом. Если практически повсеместное увеличение осадков способствует увеличению стока, то повышение температуры означает увеличение испаряемости и способно привести к снижению стока. Детальный анализ [6] позволяет сделать вывод, что на значительной части территории России и практически во всех областях страны, где расположены ГЭС, среднегодовой речной сток обнаруживает на протяжении XXI века тенденцию к возрастанию (рис. 4). Наряду с увеличением равномерности распределения стока внутри года, это позволяет заключить, что условия работы ГЭС на территории России, в основном, будут улучшаться. Средняя величина повышения выработки российских ГЭС к середине XXI века составит 3–4 %, что вполне соответствует недавним данным [9].

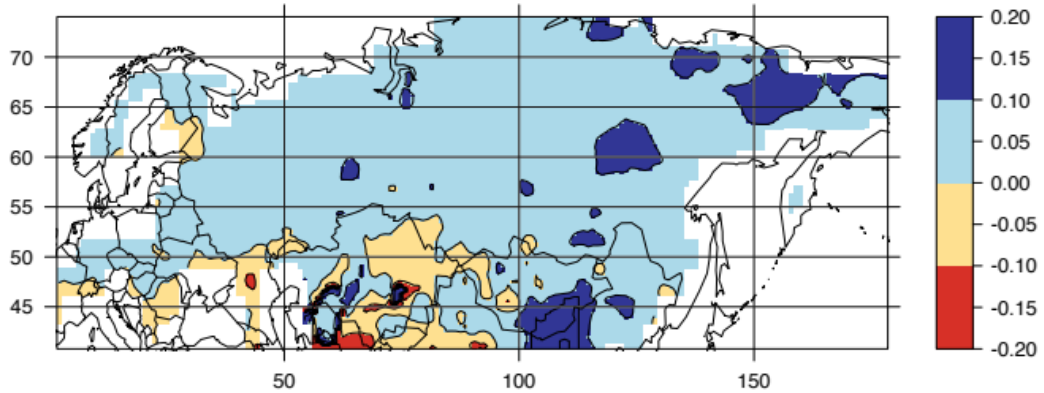


Рис. 4. Относительное изменение речного стока на территории России к середине текущего столетия
Fig. 4. The relative change in river flow in Russia by the middle of this century

Важное исключение могут составить малые ГЭС юга России, где изменение климата с высокой вероятностью приведет к снижению гидрологических ресурсов (рис. 4). Для рек с ледниковым питанием вероятно нелинейное изменение стока: увеличение в несколько ближайших десятилетий из-за таяния ледников с последующим существенным снижением. Эти эффекты определяются локальными климатическими процессами, учет которых требует использования существенно более детальных климатических моделей, что выходит за рамки нашего рассмотрения. Однако, с учетом формирования в объединённой энергосистеме Юга летнего максимума нагрузки и повышения вероятности, что тепловые и атомные станции по мере потепления климата будут сталкиваться с ограничением выдачи мощности из-за высокой температуры охлаждающей воды, этот вопрос представляется заслуживающим самого внимательного анализа.

4. ВЭС

Ветровая энергетика, которая наряду с солнечной принадлежит к энергетическим технологиям, лидирующим по темпам развития в мире, относится к технологиям ВИЭ, развитие которых поддерживается национальной энергетической стратегией России. Рассматриваются два вида применения ветроустановок: энергоснабжение изолированных энергосистем и развитие ветровой генерации в зонах централизованного энергоснабжения. Исследование возможностей ветроэнергетики в составе микроэлектрических сетей, в первую очередь, в субарктических регионах, составляет предмет отдельного направления отечественных энергетических исследований. В частности, показано [22, 23], что сочетание ветровых, солнечных и дизельных генерирующих установок предоставляет большие возможности для повышения надежности и эффективности энергоснабжения и, в конечном счете, для улучшения уровня жизни на Крайнем Севере, – несмотря на закономерные технологические трудности, сопровождающие развитие возобновляемой генерации в регионах мира с суровыми климатическими условиями.

Для успешной интеграции ветроэнергетики в состав централизованных энергетических систем принципиальное значение имеет корректный учет влияния климатических условий на работу ветрогенераторов. Для долгосрочной динамики ветроэнергетических ресурсов наши расчеты дают изменение относительной скорости ветра в пределах от –15 % до +10 % по территории России ко второй половине XXI века по сравнению с началом столетия. Следует иметь в виду, что соответствующее измене-

ние выработки ветроустановок в 2–3 раза превышает изменение скорости ветра из-за резкой зависимости электрической мощности ветроустановки от скорости ветра.

Детали пространственной структуры модельных оценок для полей скорости ветра достаточно сильно зависят от условий расчета, в частности, состава использованного ансамбля и принятого при расчетах сценария. Однако, существуют крупномасштабные особенности изменений скорости ветра, инвариантные относительно сценария и модельного ансамбля, которые, по-видимому, можно считать достаточно достоверными.

Наиболее выраженного снижения скорости ветра следует ожидать в центральной и южной частях европейской территории России, на юге Западной Сибири, а также в отдельных арктических и субарктических регионах Сибири, что согласуется с данными наблюдений [18]. В отдельных районах снижение скорости ветра может привести к снижению выработки ветрогенераторов вплоть до 15 %. К счастью, это едва ли означает наличие серьезных рисков для развития национальной ветроэнергетики, поскольку эти области заметного снижения скорости ветра находятся в тех регионах, где интенсивное развитие ветроэнергетики сейчас не обсуждается. Европейское южное побережье, Балтийское море и Кольский полуостров, где планируется строительство ветропарков, вероятно, будут подвержены относительно небольшим изменениям скорости приземного ветра в диапазоне +/–5 %.

Еще один вывод, следующий из наших расчетов, заключается в выраженной тенденции к увеличению средней скорости ветра на юге Дальнего Востока, соответствующей повышению выработки до 10–15 % (рис. 5). Для Чукотки и Камчатки, где предпринимаются попытки использовать ветроустановки в составе местных изолированных энергосистем, существующий разброс в модельных оценках пока не позволяет сделать однозначный вывод и требует уточненных расчетов. Имеет смысл еще раз подчеркнуть, что выполненные расчеты направлены в первую очередь на получение надежных крупномасштабных прогнозов изменения ветрового потенциала в долгосрочной перспективе. Мезомасштабная комбинированная гидродинамика атмосферы с локальными топографическими эффектами оказывает огромное влияние на работу ветроустановок, что делает необходимым применение процедур регионализации при использовании полученных результатов в детальных моделях энергосистем.

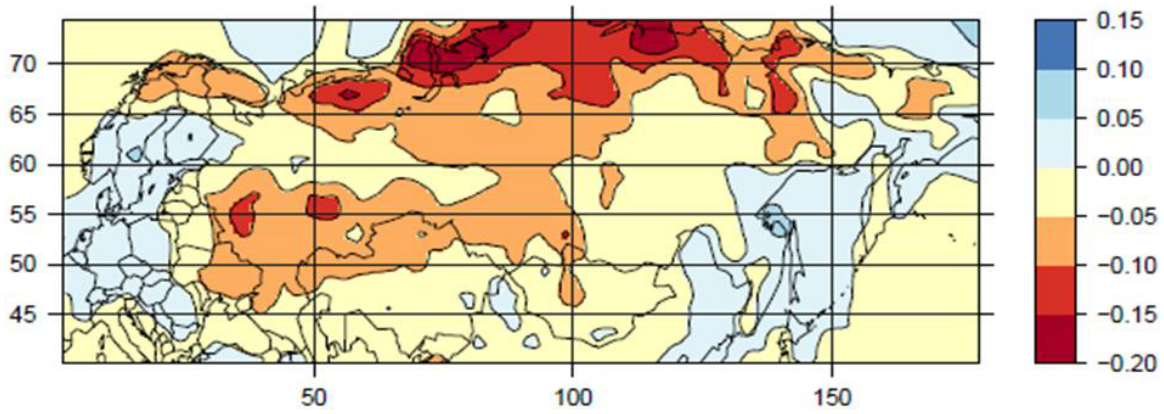


Рис. 5. Относительное изменение технического ветропотенциала на территории России к середине текущего столетия

Fig. 5. The relative change in the technical wind potential in Russia by the middle of this century

Таким образом, вопреки сложившемуся мнению, изменения климата приведут к заметному изменению ветрового режима на территории России в XXI веке. Однако, в степной зоне европейской части России и Западной Сибири, где на сегодняшний день планируется введение большей части промышленных ветропарков, влияние этих изменений будет небольшим. При этом для южной части Дальнего Востока ожидаемые изменения носят однозначно благоприятный характер.

Основные сложности в развитии ветроэнергетики России, тем не менее, будут безусловно связаны с особенностями климата, определяющими характер генерации электроэнергии ветроустановкой. Особенности спектра атмосферной турбулентности приводят к пульсирующему характеру ветровой выработки, что кардинальным образом отличает ВЭС от тепловых или атомных электростанций. Тем не менее, работа ветроустановок в составе энергосистем никоим образом не должна означать неизбежного снижения надежности электроснабжения потребителей. Более того, как показывает опыт развития ветровой энергетики в Германии, увеличение доли ветровой выработки привело даже к повышению надежности немецкой энергосистемы. Безусловно, это произошло не автоматически, но было связано в том числе с развитием электрических сетей, предназначенным именно для интеграции в энергосистему возрастающей доли высокопеременной выработки ВИЭ.

Принципиальную сложность при современном уровне техники представляет обеспечение работы энергосистемы лишь в случае когда доля возобновляемых источников в этой системе приближается к 100 %. Для решения этой задачи разработан целый ряд концепций, включая адаптационное управление нагрузкой потребителя (prosumers), координацию работы многих генерирующих установок ВИЭ (virtual power plant), использование разного рода накопителей энергии и т. д. В ближайшие одно-два десятилетия весьма вероятен переход этих технологий из состояния лабораторных разработок к реальному внедрению в энергосистемы.

Использование в составе энергосистемы 1–5 % возобновляемой генерации, что соответствует российским планам по развитию ВИЭ на ближайшие несколько лет, никаких принципиальных технических трудностей на сегодняшний день не представляет. Однако, накопленный опыт эксплуатации ветроустановок позволяет утверждать, что их успешная интеграция в энергосистемы требует изменения подхода к управлению энергосистемой и ее структуры по сравнению с энергосистемами, основанными на использовании крупных ТЭС, АЭС или ГЭС. Для России вплоть до сегодняшнего дня исследования этого вопроса практически не проводились. Более того, вступивший в силу в январе 2019 г. ГОСТ Р 58057–2018, рассматривающий общие требования к планированию развития (!) единой энергетической системы и изолированных энергосистем не предусматривает абсолютно никаких технических решений, направленных на интеграцию ВИЭ выработки ВИЭ. В качестве полноправных участников энергосистем стандарт рассматривает ТЭС, АЭС и ГЭС. Единственное упоминание ветровых и солнечных электростанций заключается в требовании их стопроцентного резервирования. Фактически это означает, что на сегодня ввод ветрогенератора в России должен дублироваться одновременным вводом равной тепловой мощности, что делает крайне сомнительными экономические перспективы ВИЭ, особенно с учетом низких цен на ископаемое топливо. Разработка альтернативных подходов к обеспечению надёжности энергосистем России, имеющих в своем составе установки ВИЭ, представляется настоятельно требующей самых интенсивных исследований.

5. Биотопливо

В России биотопливо в настоящее время составляет основу нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ) – в 2015 г. 90 % тепловой и электрической энергии, произведенной из НВИЭ, обеспечили древесное топливо, сельскохозяйственные отходы и биогаз, причем вклад двух последних видов топлива был ничтожен (рис. 1 и табл. 1). В настоящей работе пересчет электрической и тепловой энергии в первичную энергию проводился по среднему удельному расходу топлива в России на КЭС (0,326 г у.т./кВт·ч) и в котельных (166 кг у.т./Гкал) соответственно. Доля биогенерации в России оказывается немногим ниже, чем в среднем по миру, и составляет около 0,5 % от общей выработки электроэнергии.

Настоящий раздел посвящен оценке изменений энергетического потенциала лесных ресурсов в России, связанных с глобальными изменениями углеродного цикла и региональных изменений климата на территории страны. Ставилась задача рассчитать изменения размера доступных древесных ресурсов, пригодных для энергетического использования, вызванные повышением биопродуктивности лесов за счет увеличения содержания углекислого газа в атмосфере и изменения климатических условий. При этом необходимо сказать, что энергетический потенциал лесов России огромен – в них ежегодно продуцируется не менее 4 млрд т органического углерода или 5 млрд т в пересчете на условное топливо, т. е. в пять раз больше годового энергопотребления страны.

Лесная промышленность России, как и другие отрасли экономики страны, в последние десятилетия претерпевала радикальные изменения. После двукратного роста лесозаготовок в послевоенное время (со 150 млн м^3 в 1945 г. до 350 млн м^3 в 1960 г.) наблюдался 30-летний период стабильно высоких объемов вывозки древесины, сменившийся резким спадом в 1990-е гг. [26]. Минимум заготовки леса был достигнут в 1998 г. на уровне 100 млн м^3, после чего начался период стабильного роста объемов рубок, превысивших в 2017 г. 200 млн м^3 [12].

Данные различных источников по энергетическому использованию древесины в России сильно разнятся [12]. Анализ официальных материалов Росстата, Рослесхоза и Минэнерго, вызывающих сильные сомнения специалистов лесной отрасли [12–14], позволяет заключить, что в последние десятилетия в качестве топлива использовалось около 40 млн м^3 древесины в год, из которых примерно половину составляли дрова для населения, а оставшуюся часть – древесные отходы, используемые на электростанциях и в котельных. По нашим данным, действительный масштаб энергетического использования древесины существенно выше и составляет не менее 50–60 млн м^3.

Для оценки потенциальных объемов использования древесных ресурсов в энергетике были использованы данные по применению в качестве топлива отходов лесозаготовок и деревообработки, а также утилизации продукции из дерева в странах – крупнейших производителях древесины (табл. 2). Как видно из приведенных данных, в указанных странах 20–30 % от объема заготовленной деловой древесины находит применение в качестве топлива. В России в настоящее время этот показатель находится на уровне 10 %, но для перспективной оценки нами использовано значение в 25 %.

Таблица 2

Доля древесины, используемая в качестве топлива (кроме дров для населения), в общем объеме заготавливаемой деловой древесины в некоторых странах

The share of wood used as fuel (except firewood for domestic use) in the total volume of harvested commercial wood in some countries

Страна	2000	2005	2010	2015
США	0.26	0.27	0.36	0.36
Канада	0.16	0.18	0.22	0.19
Швеция	0.19	0.10	0.28	0.25
Финляндия	0.20	0.24	0.34	0.24

Источник. ООН и FAO.

Для расчетов объема лесозаготовок был использован средний («умеренный») из разработанных совместно специалистами FAO и Рослесхоза сценарий [27], экстраполированный нами до 2050 г.. Согласно этому сценарию возможный объем заготовки древесины в России к середине текущего столетия может достичь 380 млн м^3/год, что соответствует средним объемам рубок за период 1960–1990 гг. Таким образом, энергетическое использование лесных ресурсов к 2050 г. может составить 95 млн м^3. С учетом консервативной оценки децентрализованной заготовки дров для населения в 20 млн м^3/год суммарный объем древесного топлива в России может составить около 115 млн м^3/год, или, оценивая теплотворную способность древесины в 0.266 т у.т./м^3, более 30 млн т у.т./год [11].

Однако эти расчеты справедливы для неизменных природно-климатических условий. Наша же планета переживает период беспрецедентных в исторических масштабах изменений содержания углекислого газа – основного источника питания растений – и температурно-влажностных характеристик климата, которые определяют величину биопродуктивности лесов.

В результате многолетних исследований в различных естественных экосистемах [28], достаточно надежно установлены зависимости первичной нетто-продуктивности (запасании углерода растениями) деревьев от климатических параметров. В диапазоне среднегодовых температур от –5 °C до 10 °C и годового количества осадков от 200 до 1000 мм, соответствующего зонам лесных экосистем России, увеличение чистой биопродуктивности лесов (NPP – Net Primary Production) составляет 0,34 т C/га с повышением температуры воздуха на 1 градус и 0,07 т C/га с увеличением количества осадков на 10 мм/год, что полностью подтверждается результатами детальных исследований последних лет [29, 30].

Чувствительность наземной растительности к изменению концентрации углекислого газа в атмосфере оценивается различными моделями в очень широком диапазоне от 12 до 76 % при удвоении концентрации CO_2 и в среднем еще десять лет назад принималась равной 48 %. Однако, результаты многочисленных полевых испытаний, в том числе долговременных натурных экспериментов (FACE – Free-air CO_2 Enrichment) свидетельствуют о гораздо более сдержанном эффекте фертилизации, в среднем на уровне 20–25 % [29]. В настоящей работе используется компромиссная оценка в 28 %, соответствующая той, что используется в нашей боксово-диффузионной модели углеродного цикла с развитым биосферным блоком [31], которая применялась здесь для расчетов глобальных изменений содержания диоксида углерода в атмосфере. В качестве входных данных использовались сценарии антропогенного воздействия на атмосферу [32, 33], разработанные в НИУ »МЭИ» с учетом обязательств, принятых странами-участницами РКИК ООН на основе Парижского соглашения (2015 г.), которое, независимо от причин, по которым оно было принято, несомненно задает долговременный тренд развития мировой энергетики. Прогнозируемое повышение концентрации диоксида углерода с 350 млн$^{-1}$ в 1990 г. до 460 млн$^{-1}$ к 2050 г. приведет к увеличению NPP за этот период примерно на 10 %.

Модельные оценки изменения среднегодовой температуры воздуха и годового количества осадков к середине нынешнего столетия на территории России представлены на рис. 3. Следует отметить, что использованный в настоящей работе сценарий антропогенного воздействия на глобальную климатическую систему находится в нижней части обширного диапазона аналогичных сценариев RCP, используемых в современных климатических моделях [33]. Согласно модельным расчетам на основе наиболее агрессивных из них, среднегодовая температура воздуха на планете к середине текущего столетия превысит доиндустриальный уровень на 2–2.5 градуса, а ее изменения на территории России по сравнению с современными значениями составят 2.5–4 градуса [29]. Однако данные измерений состава атмосферы и температуры воздуха в течение последних десятилетий вполне определенно говорят в пользу того, что наблюдаемые климатические изменения соответствуют реализации наиболее умеренных вариантов [33], к которым относится и используемый в настоящей работе.

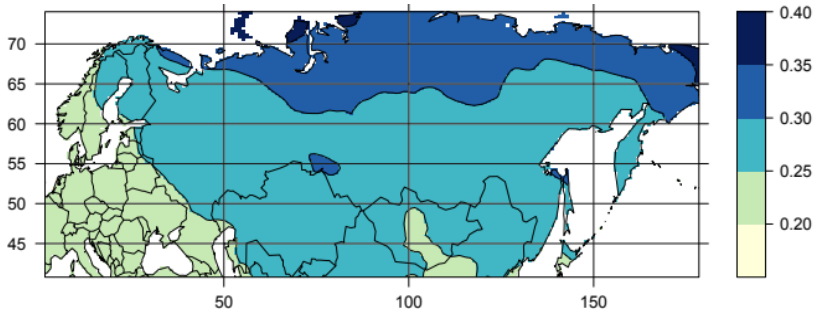


Рис. 6. Изменения чистой продуктивности лесов России к середине текущего столетия (относительно современных значений)

Fig. 6. Changes in the net productivity of Russian forests by the middle of this century (relative to modern values)

Таблица 3

Доля заготовки древесины δ*V* (от суммарного объема в России в 2008–2017 гг.), запасы древесины *W* и их удельные значения *w*, площади лесов *S*, содержание углерода в лесах *C* и его удельные значения *c*, прогнозируемые изменения температуры воздуха Δ*T*, количества осадков Δ*P* и биоэнергетических ресурсов δ*NPP* к 2050 г. (по сравнению с периодом 1971–2010 гг.) по федеральным округам России

The share of wood harvesting δ*V* (of the total volume in Russia in 2008–2017), wood reserves *W* and their specific values *w*, forest area *S*, carbon content in forests *C* and its specific values *c*, projected changes in air temperature Δ*T*, rainfall Δ*P* and bioenergy resources δ*NPP* by 2050 (compared with the period 1971–2010) in the federal districts of Russia

Федеральный округ	δ*V*, %	*W*, млрд м³	*S*, млн га	*w*, м³/га	*C*, Гт С	*c*, т С/га	Δ*T*, °С	Δ*P*, мм	δNPP (T), %	δNPP (P), %	δNPP (T, P, C), %
Центральный	10.7	4.0	23	176	2	72.2	2.5	7	18	1	31
Северо-Западный	25.8	10.4	89	118	4	48.4	1.9	9	16	1	29
Южный	0.4	0.5	3	167	0	68.7	2.5	4	14	1	26
Северо-Кавказский	0.1	0.3	2	163	0	67.1	2.5	2	14	0	25
Приволжский	15.9	5.7	38	151	2	61.9	2.3	7	19	1	32
Уральский	8.0	8.1	69	117	3	48.0	2.3	10	23	2	37
Сибирский	31.3	33.2	277	120	14	49.2	2.7	10	30	2	45
Дальневосточный	7.9	20.6	295	70	8	28.7	2.3	11	26	2	40
Россия	**100.0**	**82.8**	**795**	**104**	**34**	**42.8**	**2.4**	**7.5**	**25**	**2**	**40**

Источники. Росстат, расчеты авторов.

Результаты расчетов изменения чистой продуктивности лесов России к середине текущего столетия приведены на рис. 6.

Результаты расчетов увеличения объемов заготовки древесины в энергетических целях за счет изменения биопродуктивности лесов России к середине текущего столетия по федеральным округам сведены в табл. 3.

Эти расчеты должны быть скорректированы на возможное увеличение потерь леса из-за ожидаемого распространения болезней и вредителей, которое оценивается примерно в 10 % [13, 14]. Таким образом, в целом с тех же площадей вырубок к 2050 г. за счет повышения биопродуктивности отечественных лесов можно будет заготовить примерно на 30 % больше древесины, чем в последние десятилетия. Следовательно, обусловленное наблюдающимися и ожидаемыми природно-климатическими изменениями увеличение доступных энергетических ресурсов древесного топлива может к середине столетия составить более 9 млн т у.т., что по абсолютной величине значительно превышает климатические эффекты для других отраслей энергетики – как отрицательные для ТЭС и АЭС (ожидаемое снижение КПД тепловых циклов электростан-

ций, что приведет к дополнительному расходу топлива в 2,0 млн т у.т./год) [3–4], так и положительные для ГЭС (вероятный рост электрогенерации на 4 %, или 7–8 млрд кВт·ч/год, что эквивалентно снижению расхода органического топлива на 2,5 млн т у.т./год)

Заключение

Возобновляемые источники энергии, как и другие отрасли энергетики, в значительной мере зависят от климатических условий, причем влияние изменения этих условий носит разнонаправленный характер.

Проведенное исследование показало, что наблюдающиеся и ожидаемые на территории России изменения климата в целом благоприятны для основных отраслей ВИЭ, использующих гидроэнергетические ресурсы, энергию ветра и древесное топливо. Этот эффект повышения энергетического потенциала ВИЭ в наибольшей степени будет выражен на юге российского Дальнего Востока. Это означает, что местным энергосистемам будет предоставлен, быть может, уникальный шанс модернизации на более современной технологической базе по сравнению с угольными электростанциями, составляющими существенную часть сегодняшних энергосистем. Изменение климата благоприятствует планам внедрения возобновляемых источников энергии в изолированные энергосистемы, реализация которых в настоящее время постепенно начинается в энергетических системах Дальнего Востока.

Суммарный энергетический эффект (замещение органического топлива) к середине текущего столетия может составить более 10 млн т у.т. по инерционному сценарию, а при ускоренном развитии ВИЭ в России – в 2–3 раза больше, что значительно превышает по абсолютной величине негативные эффекты климатических изменений в теплоэнергетике за счет снижения эффективности работы паровых и газовых турбин (рис. 7)

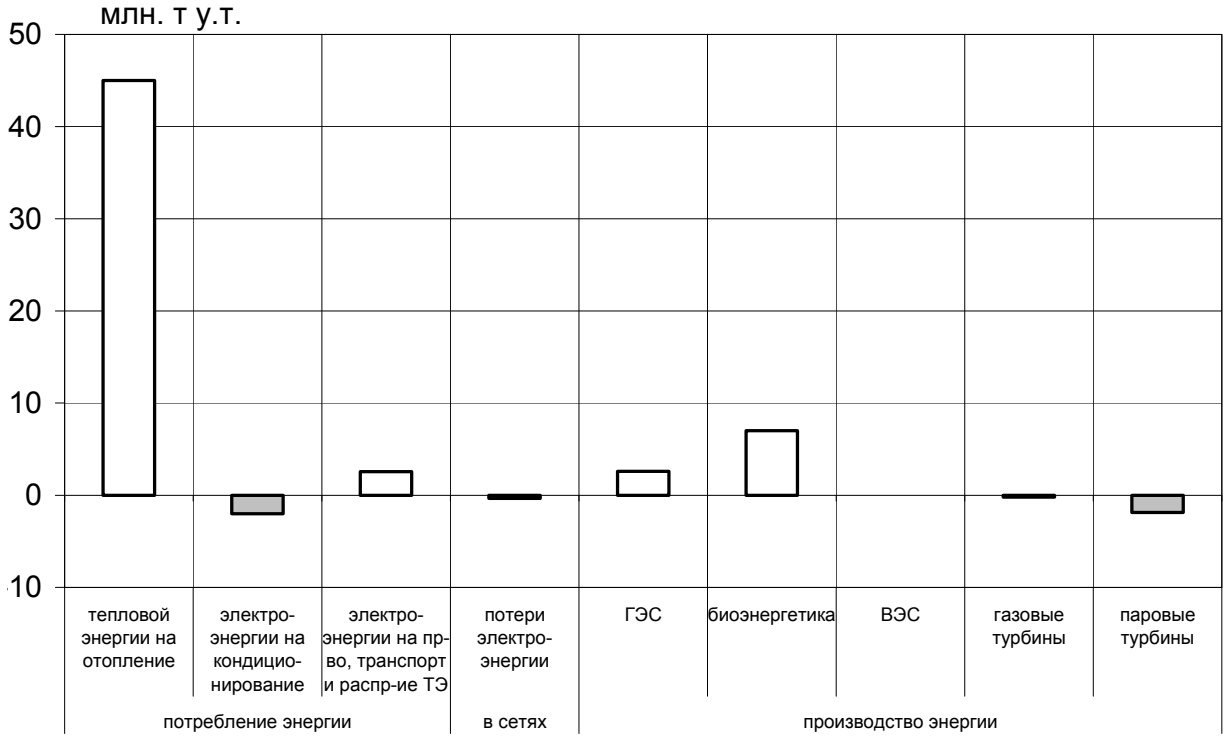


Рис. 7. Экономия потребления органического топлива за счет влияния климатических изменений на производство, распределение и потребление различных видов энергии в России

Fig. 7. Fossil fuels conservation due to the impact of climate change on the production, distribution and consumption of various types of energy in Russia

Однако, в силу значительной пространственной неравномерности наблюдающихся и ожидаемых изменений климатических характеристик (температуры воздуха, количества осадков, скорости ветра), их учет необходим при проектировании новых объектов ВИЭ. Так, модельные расчеты указывают на снижение речного стока в южных регионах европейской части России и уменьшение ветроэнергетического потенциала в западной части страны, что нужно принимать во внимание при разработке схем размещения малых ГЭС и ветропарков. Однако, наиболее критическим для развития ВИЭ в России, безусловно, является учёт особенностей возобновляемой генерации при ее интеграции в энергосистемы.

В работе использованы данные Федеральной службы статистики России (Росстат, www.gks.ru), Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации Росгидромета (ВНИИГМИ-МЦД, www.meteo.ru), Организации по продовольствию и сельскому хозяйству ООН (FAO, www.faostat.org), Международного энергетического агентства (IEA, www.iea.org), компании British Petroleum (www.bp.org), Национальной службы по исследованиям атмосферы и океана (NOAA, www.noaa.gov), Министерства энергетики РФ (Минэнерго, www.minenergo.gov.ru), Системного оператора ЕЭС России (СО ЕЭС, www.so-ups.ru)

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 13.1137.2017/ПЧ) в части моделирования климатических изменений на территории России, РФФИ (грант 17-08-00134) в части оценки потенциала энергетических биоресурсов в России и РНФ (грант 18-79-10255) в части анализа практик применения НВИЭ с учетом изменения климатических условий. Авторы благодарны Немецкому климатическому расчетному центру и рабочим группам проекта CMIP5, перечисленным в таблице Приложения, за предоставленный доступ к результатам глобальных климатических моделей.

Приложение

Модели CMIP5, результаты которых были использованы в настоящей работе для получения ансамблевых оценок

Название модели	Институт	Описание
ACCESS 1.0 ACCESS 1.3	Научный и промышленный исследовательский центр Содружества / Метеорологический центр, Австралия (CSIRO-BOM)	[П1]
BNU-ESM	Пекинский педагогический университет, Китай (BNU)	[П2]
CanESM2	Канадский центр моделирования и анализа климата (CCCMA)	[П3]
CMCC-CESM CMCC-CMS CMCC-CM	Европейско-Средиземноморский центр изучения изменений климата, Италия (CMCC)	[П4]
CNRM-CM5	Национальный центр метеорологических расчетов, Европейский расчетный центр и образования в области научных вычислений, Франция (CNRM-CERFACS)	[П5]
CSIRO-Mk 3.6.0	Научный и промышленный исследовательский центр Содружества / Центр изучения изменений климата в Квинсленде, Австралия (CSIRO-QCCCE)	[П6]
GFDL-CM3 GFDL-ESM2G GFDL-ESM2M	Лаборатория геофизической гидродинамики, США (NOAA GFDL)	[П7, П8]
HadGEM2-CC HadGEM2-ES	Центр прогнозирования и исследования климата Хедли, Великобритания (MOHC)	[П9]
IPSL-CM5A-LR IPSL-CM5A-MR IPSL-CM5B-LR	Институт Пьера Симона Лапласа, Франция (IPSL)	[П10]

Окончание таблицы

Название модели	Институт	Описание
MIROC-ESM MIROC-ESM-CHEM MIROC5	Токийский университет, Институт исследований атмосферы и океана, Национальный институт экологических исследований и Японское агентство океанологии и технологии, Япония (MIROC)	[П11, П12]
MPI-ESM-LR MPI-ESM-MR	Метеорологический институт ми. Макса Планка, Германия (MPI-M)	[П13]
MRI-CGCM3 MRI-ESM1	Институт метеорологических исследований, Япония (MRI)	[П14]
bcc-csm1-1-m bcc-csm1-1	Пекинский климатический центр, Китай (BCC)	[П15]
inmcm4	Институт вычислительной математики Российской академии наук, Россия (INM)	[П16]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ПРИЛОЖЕНИЮ

[П1] **Bi D., Dix M., Marsland S., O'Farrell S., Rashid H., Uotila P., Hirst A., Kowalczyk E., Golebiewski M., Sullivan A., Yan H., Hannah N., Franklin C., Sun Z., Vohralik P., Watterson I., Zhou X., Fiedler R., Collier M., Ma Y., Noonan J., Stevens L., Uhe P., Zhu H., Griffies S., Hill R., Harris C., Puri K.** The ACCESS coupled model: description, control climate and evaluation // Australian Meteorological and Oceanographic Journal. 2013. Vol. 63. P. 41–64. DOI: 10.22499/2.6301.004

[П2] **Ji D., Wang L., Feng J., Wu Q., Cheng H., Zhang Q., Yang J., Dong W., Dai Y., Gong D., Zhang R.H., Wang X., Liu J., Moore J.C., Chen D., Zhou M..** Description and basic evaluation of Beijing Normal University Earth System Model (BNU-ESM) version 1 // Geoscientific Model Development Discussions. 2014. Vol.7, no. 5. P. 2039–2064. DOI: 10.5194/gmd-7-2039-2014

[П3] **Arora V.K., Boer G.J.** Terrestrial ecosystems response to future changes in climate and atmospheric co2 concentration // Biogeosciences. 2014. Vol. 11, no. 15. P. 4157–4171. DOI: 10.5194/bg-11-4157-2014

[П4] **Fogli P.G., Iovino D.** CMCC-CCESM-NEMO: Toward the New CMCC Earth System Model. 2014 CMCC Research Paper No. 248. URL: https://ssrn.com/abstract=2603176. DOI: 10.2139/ssrn.2603176

[П5] **Voldoire A., Sanchez-Gomez E., Salas y Mélia D., Decharme B., Cassou C., Sénési S., Valcke S., Beau I., Alias A., Chevallier M., Déqué M., Deshayes J., Douville H., Fernandez E., Madec G., Maisonnave E., Moine M.P., Planton S., Saint-Martin D., Szopa S., Tyteca S., Alkama R., Belamari S., Braun A., Coquart L., Chauvin F.** The CNRM-CM5.1 global climate model: Description and basic evaluation // Climate Dynamics. 2013. Vol. 40, No. 9–10. P. 2091–2121. DOI: 10.1007/s00382-011-1259-y

[П6] **Gordon H.B., O'Farrell S.P., Collier M.A., Dix M.R., Rotstayn L.D., Kowalczyk E.A., Hirst A.C., Watterson I.G.** The CSIRO Mk3.5 Climate Model. Technical Report No. 21. The Centre for Australian Weather and Climate Research, Aspendale, Vic., Australia. 2010. 62 p.

[П7] **Griffies S.M., Winton M., Donner L.J., Horowitz L.W., Downes S.M., Farneti R., Gnanadesikan A., Hurlin W.J., Lee H.C., Liang Z., Palter J.B., Samuels B.L., Wittenberg A.T., Wyman B.L., Yin J., Zadeh N.** The GFDL CM3 coupled climate model: Characteristics of the ocean and sea ice simulations // Journal of Climate. 2011. Vol. 24. P. 3520–3544. DOI: 10.1175/2011JCLI3964.1

[П8] **Dunne J.P., John J.G., Shevliakova S., Stouffer R.J., Krasting J.P., Malyshev S.L., Milly P.C., Sentman L.T., Adcroft A.J., Cooke W., Dunne K.A., Griffies S.M., Hallberg R.W., Harrison M.J., Levy H., Wittenberg A.T., Phillips P.J., Zadeh N.** GFDL's ESM2 global coupled climate-carbon earth system models. Part II: Carbon system formulation and baseline simulation characteristics // Journal of Climate. 2013. Vol. 26, No. 7. P. 2247–2267. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00150.1

[П9] **Martin G.M., Bellouin N., Collins W.J., Culverwell I.D., Halloran P.R., Hardiman S.C., Hinton T.J., Jones C.D., McDonald R.E., McLaren A.J., O'Connor F.M., Roberts M.J., Rodriguez J.M., Woodward S., Best M.J., Brooks M.E., Brown A.R., Butchart N., Dearden C., Derbyshire S.H., Dharssi I., Doutriaux-Boucher M., Edwards J.M., Falloon P.D., Gedney N., Gray L.J., Hewitt H.T., Hobson M., Huddleston M.R., Hughes J., Ineson S., Ingram W.J., James P.M., Johns T.C., Johnson C.E., Jones A., Jones C.P., Joshi M.M., Keen A.B., Liddicoat S., Lock A.P., Maidens A.V., Manners J.C., Milton S.F., Rae J.G., Ridley J.K., Sellar A., Senior C.A.,**

Totterdell I.J., Verhoef A., Vidale P.L., Wiltshire A. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations // Geoscientific Model Development Discussions. 2011. Vol. 4, no. 3. P. 723–757. DOI: 10.5194/gmd-4-723-2011

[П10] **Dufresne J.L., Foujols M.A., Denvil S., Caubel A., Marti O., Aumont O., Balkanski Y., Bekki S., Bellenger H., Benshila R., Bony S., Bopp L., Braconnot P., Brockmann P., Cadule P., Cheruy F., Codron F., Cozic A., Cugnet D., de Noblet N., Duvel J.P., Ethé C., Fairhead L., Fichefet T., Flavoni S., Friedlingstein P., Grandpeix J.Y., Guez L., Guilyardi E., Hauglustaine D., Hourdin F., Idelkadi A., Ghattas J., Joussaume S., Kageyama M., Krinner G., Labetoulle S., Lahellec A., Lefebvre M.P., Lefevre F., Levy C., Li Z.X., Lloyd J., Lott F., Madec G., Mancip M., Marchand M., Masson S., Meurdesoif Y., Mignot J., Musat I., Parouty S., Polcher J., Rio C., Schulz M., Swingedouw D., Szopa S., Talandier C., Terray P., Viovy N., Vuichard N.** Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: From CMIP3 to CMIP5 // Climate Dynamics. 2013. Vol. 40, no. 9–10. P. 2123–2165. DOI: 10.1007/s00382-012-1636-1

[П11] **Watanabe M., Suzuki T., O'Ishi R., Komuro Y., Watanabe S., Emori S., Takemura T., Chikira M., Ogura T., Sekiguchi M., Takata K., Yamazaki D., Yokohata T., Nozawa T., Hasumi H., Tatebe H., Kimoto M.** Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity // Journal of Climate. 2010. Vol. 23. P. 6312–6335. doi:10.1175/2010JCLI3679.1

[П12] **Watanabe S., Hajima T., Sudo K., Nagashima T., Takemura T., Okajima H., Nozawa T., Kawase H., Abe M., Yokohata T., Ise T., Sato H., Kato E., Takata K., Emori S., Kawamiya M.** MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments // Geoscientific Model Development Discussions. 2011. Vol. 4, no. 2. P. 1063–1128. DOI: 10.5194/gmd-4-845-2011

[П13] **Giorgetta M.A., Jungclaus J., Reick C.H., Legutke S., Bader J., Böttinger M., Brovkin V., Crueger T., Esch M., Fieg K., Glushak K., Gayler V., Haak H., Hollweg H., Ilyina T., Kinne S., Kornblueh L., Matei D., Mauritsen T., Mikolajewicz U., Mueller W., Notz D., Pithan F., Raddatz T., Rast S., Redler R., Roeckner E., Schmidt H., Schnur R., Segschneider J., Six K.D., Stockhause M., Timmreck C., Wegner J., Widmann H., Wieners K., Claussen M., Marotzke J., Stevens B.** Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5 // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2013. Vol. 5. P. 1–26. DOI: 10.1002/jame.20038

[П14] **Yukimoto S., Adachi Y., Hosaka M., Sakami T., Yoshimura H., Hirabara M., Tanaka T.Y., Shindo E., Tsujino H., Deushi M., Mizuta R., Yabu S., Obata A., Nakano H., Koshiro T., Ose T., Kitoh A.** A New Global Climate Model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3. Model Description and Basic Performance // Journal of the Meteorological Society of Japan. 2012. Vol. 90A. P. 23–64. DOI: 10.2151/jmsj.2012-a02

[П15] **Xiao-Ge X., Tong-Wen W., Jie Z.** Introduction of CMIP5 Experiments Carried out with the Climate System Models of Beijing Climate Center // Advances in Climate Change Research. Vol. 4. P. 41–49. 2015. DOI: 10.3724/sp.j.1248.2013.041

[П16] **Volodin E.M., Dianskii N.A., Gusev A.V.** Simulating present-day climate with the INMCM4.0 coupled model of the atmospheric and oceanic general circulations // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2010. Vol. 46, no. 4. P. 414–431. DOI: 10.1134/s000143381004002x

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field C.B., Barros V.R., Dokken D.J., Mach K.J., Mastrandrea M.D., Bilir T.E., Chatterjee M., Ebi K.L., Estrada Y.O., Genova R.C., Girma B., Kissel E.S., Levy A.N., MacCracken S., Mastrandrea P.R., White L.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1132 p.

[2] Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории РФ / под ред. В.М. Катцова, С.М. Семенова. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с.

[3] **Klimenko V.V., Fedotova E.V., Tereshin A.G.** Vulnerability of the Russian power industry to the climate change // Energy. 2018. Vol. 142. P. 1010–11022. DOI: 10.1016/j.energy.2017.10.069

[4] **Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г., Федотова Е.В.** Влияние изменений климата на производство, распределение и потребление энергии в России // Теплоэнергетика. 2018. № 5. С. 5–16.

[5] **Порфирьев Б.Н., Рогинко С.А.** Энергетика на возобновляемых источниках: перспективы в мире и в России // Вестник РАН. 2016. Т. 86, № 1. С. 963–971.

[6] **Клименко В.В., Федотова Е.В.** Гидроэнергетика России в условиях глобальных изменений климата // Доклады РАН. 2019. Т. 484. № 2. С. 156–160.

[7] **Александровский А.Ю., Клименко В.В., Терешин А.Г., Микушина О.В., Касилова Е.В., Волков Д.М., Борщ П.С., Подольский М.С., Пугачев Р.В., Солдаткин А.Ю., Сычев Д.С.** Особенности функционирования гидроэнергетики России в изменяющихся внешних условиях (на примере Волжско-Камского каскада ГЭС) / под общ. ред. проф. А.Ю. Александровского и чл.-корр. РАН В.В. Клименко. М.: ИД Энергия, 2016. 170 с.

[8] **Федоров М.П., Елистратов В.В., Акентьева Е.М.** Гидроэнергетика в условиях вероятных климатических изменений // Гидротехническое строительство. 2014. № 6. С. 17–23.

[9] **Федоров М.П., Акентьева Е.М., Елистратов В.В., Масликов В.И., Сидоренко Г.И.** Водно-энергетические режимы гидроэлектростанций в условиях климатических изменений / под ред. Ю.С. Васильева. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. 274 с.

[10] **Васильев Ю.С., Сидоренко Г.И., Фролов В.В.** Методика обоснования параметров малых гидроэлектростанций // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2012. № 1–1 (147). С. 76–84.

[11] **Klimenko V., Mikushina O., Tereshin A.** Increase of Energy Potential of Russian Forest resources due to Climate Change and CO_2 Fertilization // E3S Web Conf. 2019. Vol. 103 Id. 02005. URL: https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910302005

[12] **Левин А.Б., Суханов В.С., Шереметьев Д.В.** Энергетический потенциал топливного ресурса лесной биоэнергетики РФ // Лесной вестник. 2010. № 4. С. 37–42.

[13] **Кракснер Ф., Ледук С., Фусс С., Щепащенко Д.Г., Швиденко А.З.** Подходы к развитию устойчивой биоэнергетики на основе лесных ресурсов северной Евразии // Сибирский лесной журнал. 2018. № 1. С. 16–25.

[14] **Замолодчиков Д., Краев Г.** Влияние изменений климата на леса России. Зафиксированные воздействия и прогнозные оценки // Устойчивое лесопользование. 2016. № 4. С. 23–31.

[15] **Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г.** От Рио до Киото и Парижа: как усилия по охране глобального климата влияют на развитие мировой энергетики // Теплоэнергетика. 2019. № 11. (in press)

[16] **Milly P.C.D., Betancourt J., Falkenmark M., Hirsch R.M., Kundzewicz Z.W., Lettenmaier D.P., Stouffer R.J.** Stationarity is dead: Whither water management? // Science. 2008. Vol. 319. P. 573–574.

[17] **Klimenko V.V., Fedotova E.V.** Development of multi-model ensemble climate estimates using open-source environment // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 211. id. E2111084/ DOI: 10.1088/1755-1315/211/1/012084

[18] **Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н.** Изменения режима ветра на территории России в последние десятилетия // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2013. Вып. 568. С. 156–173.

[19] **Carvalho D., Rocha A., Gómez-Gesteira M., Silva Santos C.** Potential impacts of climate change on European wind energy resource under the CMIP5 future climate projections // Renewable Energy. 2017. Vol. 101. P. 29–40. DOI: 10.1016/j.renene.2016.08.036

[20] **Школьник И.М., Мелешко В.П., Стадник В.В., Хлебникова Е.И., Акентьева Е.М., Генихович Е.Л., Киселев А.А.** Влияние климата на производство и потребление энергии в России // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2014. Вып. 573. С. 92–222.

[21] **Попова В.А., Георгиади А.Г.** Спектральные оценки связи изменчивости стока Волги и Североатлантического колебания в 1882–2007 гг. // Изв. РАН. Серия географическая. 2017. № 2. С. 47–59.

[22] **Елистратов В.В., Виноградова (Чернова) А.В.** Моделирование режимов работы энергетического комплекса ВЭС-ГЭС в децентрализованной системе энергоснабжения // Альтернативная энергетика и экология. 2016. № 9–10. С. 12–24. DOI: 10.15518/isjaee.2016.09-10.012-024

[23] **Кузнецов Н.М., Коновалова О.Е., Победоносцева В.В.** Управление энергоэффективностью в регионах Арктической зоны РФ // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 8, № 17. С. 20–34.

[24] **Gustavsson L., Haus S., Lundblad M., Lundström A., Ortiz C.A., Sathre R., Le Truong N., Wikberg P.-E.** Climate change effects of forestry and substitution of carbon-intensive materials and fossil fuels // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 67. P. 612–624.

[25] **Giuntoli J., Agostini A., Caserini S., Lugato E., Baxter D., Marelli L.** Climate change impacts of power generation from residual biomass // Biomass and Bioenergy. 2016. Vol. 89. P. 146–158.

[26] **Колесников И.В., Велищанский В.М., Литвиненко Б.Д., Локшин М.М., Некрасов Н.С., Акимов В.М., Гиряев М.Д.** Лесопользование в Российской Федерации в 1946–1992 гг. М.: Рослесхоз, 1996. 313 с.

[27] Прогноз развития лесного сектора Российской Федерации до 2030 года / под ред. А. Петрова,

М. Лобовикова. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных наций. Рим: ФАО, 2012. 96 с.

[28] **Кобак К.И.** Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 248 с.

[29] Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. R.K. Pachauri, L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 151 p.

[30] **Schaphoff S., Reyera C.P.O., Schepaschenko D., Gertena D., Shvidenko A.** Observed and projected climate change impacts on Russia's forests and its carbon balance // Forest Ecology and Management. 2016. Vol. 361. P. 432–444.

[31] **Klimenko A.V., Klimenko V.V., Fyodorov M.V., Snytin S.Yu.** Modification of Major CO2 Sources under Conditions of the Man-Change Environment, Proc. of the 5th International Energy Conference. Seoul, Korea, 5 (1993) 56–61.

[32] **Клименко В.В., Клименко А.В., Микушина О.В., Терешин А.Г.** Парижская конференция по климату – поворотный пункт в истории мировой энергетики // Доклады РАН. 2016. Т. 468, № 5. С. 521–524.

[33] **Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г.** Опыт построения дальних прогнозов воздействия мировой энергетики на атмосферу Земли // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 2. С. 158–168.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КЛИМЕНКО Владимир Викторович – *член-корреспондент РАН, доктор технических наук, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории Национального исследовательского университета «МЭИ»*
E-mail: nilgpe@mpei.ru

ТЕРЕШИН Алексей Германович – *доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Национального исследовательского университета «МЭИ»*
E-mail: TereshinAG@mpei.ru

ФЕДОТОВА Екатерина Валерьевна – *кандидат технических наук, старший научный сотрудник Национального исследовательского университета «МЭИ»*
E-mail: KasilovaEV@mpei.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 06.09.2019

REFERENCES

[1] Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

[2] Vtoroy otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii RF [The Second Roshydromet Assessment Report on Climate Change and its Consequences in the Russian Federation]. Ed. V.M. Kattzov, S.M. Semenov. Moscow: Roshydromet, 2014.

[3] **V.V. Klimenko, E.V. Fedotova, A.G. Tereshin,** Vulnerability of the Russian power industry to the climate change, Energy, 142 (2018) 1010–11022. DOI: 10.1016/j.energy.2017.10.069

[4] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, A.G. Tereshin, Ye.V. Fedotova,** Impact of climate change on energy production, distribution, and consumption in Russia, Thermal Engineering, 65 (5) (2018) 247–257.

[5] **B.N. Porfiryev, S.A. Roginko,** A. Energy on renewable sources: Prospects for the world and for Russia, Herald of the Russian Academy of Sciences, 86 (6) (2016) 433–440.

[6] **V.V. Klimenko, Ye.V. Fedotova,** Russian hydropower under the global climate change, Doklady Physics, 64 (1) (2019) 39–43.

[7] **A.Yu. Aleksandrovskiy, V.V. Klimenko, A.G. Tereshin, O.V. Mikushina, Ye.V. Kasilova, D.M. Volkov, P.S. Borshch, M.S. Podolskiy, R.V. Pugachev, A.Yu. Soldatkin, D.S. Sychev,** Osobennosti funktsionirovaniya gidroenergetiki Rossii v izmenyayushchikhsya vneshnikh usloviyakh (na primere Volzhsko-Kamskogo kaskada GES) [Peculiarities of Hydropower Operation in Russia under Changing External

Conditions (the Volga-Kama Cascade Case Study]. Ed. A.Yu. Aleksandrovsky, V.V. Klimenko. Moscow: Energija Publ. House, 2016.

[8] **M.P. Fedorov, V.V. Yelistratov, Ye.M. Akentyeva,** Hydraulic power engineering under conditions of probable climate changes, Power Technology and Engineering, 48 (4) (2014) 277–283.

[9] **M.P. Fedorov, Ye.M. Akentyeva, V.V. Yelistratov, V.I. Maslikov, G.I. Sidorenko,** Vodno-energeticheskiye rezhimy gidroelektrostantsiy v usloviyakh klimaticheskikh izmeneniy [Water – power regimes of hydropower plants under conditions of climate change]. Ed. by Yu.S. Vasiliev. St. Petersburg: StPbPU Publ., 2017.

[10] **Yu.S. Vasilyev, G.I. Sidorenko, V.V. Frolov,** Metodika obosnovaniya parametrov malykh gidroelektrostantsiy [Method of substantiation of parameters of small hydropower plants]. St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 1–1 (147) (2012) 76–84.

[11] **V. Klimenko, O. Mikushina, A. Tereshin,** Increase of Energy Potential of Russian Forest resources due to Climate Change and CO2 Fertilization, E3S Web Conf., 103 (2019). Id. 02005. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910302005

[12] **A.B. Levin, V.S. Sukhanov, D.V. Sheremetyev.** Energeticheskiy potentsial toplivnogo resursa lesnoy bioenergetiki RF [Power potential of fuel resources of wood bioenergy in Russia], Lesnoy vestnik [Forestry Bulletin], 4 (2010) 37–42.

[13] **F. Kraxner, S. Leduk, S. Fuss, D.G. Shchepashchenko, A.Z. Shvidenko,** Sustainable forest-based bioenergy in Eurasia, Sibirskij Lesnoj Zurnal [Siberian Journal of Forest Science], 1 (2018) 16–25.

[14] **D. Zamolodchikov, G. Krayev,** Vliyaniye izmeneniy klimata na lesa Rossii. Zafiksirovannyye vozdeystviya i prognoznyye otsenki [Impact of climatic changes on Russian forests: recorded impacts and forecasts], Ustoychivoye lesopolzovaniye, 4 (2016) 23–31.

[15] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, A.G. Tereshin,** From Rio to Paris via Kyoto: How the efforts to protect the global climate affect the development of the world power industry, Thermal Engineering, 66 (11) (2019) 769–778.

[16] **P.C.D. Milly, J. Betancourt, M. Falkenmark, R.M. Hirsch, Z.W. Kundzewicz, D.P. Lettenmaier, R.J. Stouffer,** Stationarity is dead: Whither water management? Science, 319 (2008) 573–574.

[17] **V.V. Klimenko, E.V. Fedotova,** Development of multi-model ensemble climate estimates using open-source environment, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 211 (2018) Id. E2111084. DOI: 10.1088/1755-1315/211/1/012084

[18] **O.N. Bulygina, N.N. Korshunova, V.N. Razuvayev,** Izmeneniya rezhima vetra na territorii Rossii v posledniye desyatiletiya [Changes in the wind regime over Russia in the last decades], Tr. Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voyeykova [Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory], 568 (2013) 156–173.

[19] **D. Carvalho, A. Rocha, M. Gómez-Gesteira, C. Silva Santos,** Potential impacts of climate change on European wind energy resource under the CMIP5 future climate projections, Renewable Energy, 101 (2017) 29–40. DOI: 10.1016/j.renene.2016.08.036

[20] **I.M. Shkolnik, V.P. Meleshko, V.V. Stadnik, Ye.I. Khlebnikova, Ye.M. Akentyeva, Ye.L. Genikhovich, A.A. Kiselev,** Vliyaniye klimata na proizvodstvo i potrebleniye energii v Rossii [Impact of climate change on energy production and consumption in Russia], Tr. Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voyeykova [Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory], 573 (2014) 92–222.

[21] **V.A. Popova, A.G. Georgiadi,** Spektralnyye otsenki svyazi izmenchivosti stoka Volgi i Severoatlanticheskogo kolebaniya v 1882–2007 gg. [Spectral Evaluations of the Link between Variability of the Volga River Runoff and the North Atlantic Oscillation in 1882–2007], Izv. RAN. Seriya geograficheskaya[RAS Proceedings. Georgaphy Series], 2 (2017) 47–59.

[22] **V.V. Yelistratov, A.V. Vinogradova (Chernova),** Modelirovaniye rezhimov raboty energeticheskogo kompleksa VES-GES v detsentralizovannoy sisteme energosnabzheniya [Simulation of WPP/HPP power system operating modes in decentralized power supply system], Alternativnaya energetika i ekologiya [Alternative Energy and Ecology], 9–10 (2016) 12–24. DOI: 10.15518/isjaee.2016.09-10.012-024

[23] **N.M. Kuznetsov, O.Ye. Konovalova, V.V. Pobedonostseva,** Upravleniye energoeffektivnostyu v regionakh Arkticheskoy zony RF [Management of energy efficiency in the regions of the arctic zone of the Russian federation], Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN [Transactions of Kola Science Centre. Energy Technology Series 17], 8 (17) (2018) 20–34 20–34.

[24] **L. Gustavsson, S. Haus, M. Lundblad, A. Lundström, C.A. Ortiz, R. Sathre, N. Le Truong, P.-E. Wikberg,** Climate change effects of forestry and substitution of carbon-intensive materials and fossil fuels, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 67 (2017) 612–624.

[25] **J. Giuntoli, A. Agostini, S. Caserini, E. Lugato, D. Baxter, L. Marelli,** Climate change impacts of power generation from residual biomass, Biomass and Bioenergy, 89 (2016) 146–158.

[26] **I.V. Kolesnikov, V.M. Velishchanskiy, B.D. Litvinenko, M.M. Lokshin, N.S. Nekrasov, V.M. Akimov, M.D. Giryayev,** Lesopolzovaniye v Rossiyskoy Federatsii v 1946–1992 gg. [Forest management in Russia 1946–1992]. Rosleskhoz [Research and Information Centre for Forest Resources], Moscow, 1996.

[27] **A. Petrov, M. Lobovikov (eds),** The Russian Federation Forest Sector: Outlook Study to 2030. FAO, Roma, 2012.

[28] **K.I. Kobak,** Bioticheskiye komponenty uglerodnogo tsikla. [Biotic Components of the Carbon Cycle]. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1988.

[29] Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. R.K. Pachauri, L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.

[30] **S. Schaphoff, C.P.O. Reyera, D. Schepaschenko, D. Gertena, A. Shvidenko,** Observed and projected climate change impacts on Russia's forests and its carbon balance, Forest Ecology and Management, 361 (2016) 432–444.

[31] **A.V. Klimenko, V.V. Klimenko, M.V. Fyodorov, S.Yu. Snytin,** Modification of Major CO2 Sources under Conditions of the Man-Change Environment, Proc. of the 5th International Energy Conference. Seoul, Korea, 5 (1993) 56–61.

[32] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, O.V. Mikushina, A.G. Tereshin,** The 2015 Paris climate conference: a turning point in the world's energy history, Doklady Physics, 61 (6) (2016) 301–304.

[33] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, A.G. Tereshin,** Test of developing long-term forecasts of world energy impact on the earth's atmosphere, Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics, 51 (2) (2015) 138–147.

THE AUTHORS

KLIMENKO Vladimir V. – *National Research University «Moscow Power Engineering Institute»*
E-mail: nilgpe@mpei.ru
TERESHIN Alekseii G. – *National Research University «Moscow Power Engineering Institute»*
E-mail: TereshinAG@mpei.ru
FEDOTOVA Ekaterina V. – *National Research University «Moscow Power Engineering Institute»*
E-mail: KasilovaEV@mpei.ru

Received: 06.09.2019

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019

DOI: 10.18721/JEST.25302
УДК 621.039

В.И. Гуменюк[1], А.Ю. Туманов[1], Г.Л. Атоян[2]

1 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
2 – Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, Россия

АТОМНАЯ ОТРАСЛЬ РОССИИ: РАЗВИТИЕ В НОГУ СО ВРЕМЕНЕМ

Ожидается, что необходимость решения проблемы глобальной нехватки энергетических ресурсов в XXI веке послужит новым импульсом в развитии атомной отрасли России. Развитие, безусловно, должно проходить с учетом достижений и опыта, приобретенных атомной отраслью в предыдущие годы. Намечается активное внедрение инновационных технологий – как в области мониторинга состояния оборудования атомных станций (АС), так и в области переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). К концу XXI века предполагаемое освоение замкнутого топливного цикла является необходимым условием экономического роста, как и выход на рынок промышленных энергетических реакторов. Для успешной реализации долгосрочной стратегии развития необходимо своевременное решение существующих проблем атомной отрасли, а также постановка новых, адекватных времени вопросов. В частности, для атомной отрасли особую важность представляют задачи прогнозирования и предупреждения чрезвычайных ситуаций (ЧС) на ядерных энергетических объектах.

Ключевые слова: атомная отрасль, ядерная энергетика, атомная станция, ядерный реактор, энергетическая установка, термоядерный реактор, ИТЭР, мониторинг, прогнозирование, чрезвычайная ситуация.

Ссылка при цитировании:
Гуменюк В.И., Туманов А.Ю., Атоян Г.Л. Атомная отрасль России: развитие в ногу со временем // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 3. С. 28–46. DOI: 10.18721/JEST.25302

V.I. Gumenyuk[1], A.Yu. Toumanov[1], G.L. Atoyan[2]

1 – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia
2 – St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS, St. Petersburg, Russia

ATOMIC INDUSTRY OF RUSSIA: KEEPING UP WITH THE TIMES

It is expected that the necessity to solve the problem of global deficiency of energy resources in the 21st century may give a new impulse to the development of atomic industry in Russia. The development undoubtedly should proceed taking into account the achievements and the experience acquired by the atomic industry in the previous years. Active introduction of innovative technologies is expected, both in the area of monitoring of the state of equipment of nuclear power plants, and in the area of processing the spent fuel. The planned mastering of the closed fuel cycle is the necessary condition of economic growth as well as entering the market of industrial energy reactors by the end of the 21st century. Successful implementation of the long-term development strategy requires timely solution of existing problems of the atomic industry as well as posing new challenges in step with the times. In particular, the tasks of forecasting and prevention of emergency situations (ES) at nuclear energy objects are of special importance.

Keywords: atomic industry, nuclear energy, nuclear plant, nuclear power reactor, energy unit, thermonuclear reactor, ITER, monitoring, forecasting, emergency situation.

Citation:
V.I. Gumenyuk, A.Yu. Toumanov, G.L. Atoyan, Atomic industry of Russia: keeping up with the times, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 25 (03) (2019) 28–46. DOI: 10.18721/JEST.25302

Введение. Вопрос энергопотребления современной цивилизации стоит очень остро. Согласно наиболее скромным оценкам, к середине XXI века потребление энергии на планете удвоится. Невозобновляемость природных ресурсов (нефть, газ, уголь) заставляет задуматься о переходе к альтернативным источникам электроэнергии, таких как тепло земных недр, ветрогенераторы, излучение Солнца. Однако не всегда климатические и географические условия позволяют их использовать. Необходимые для этого технологии еще не достаточно развиты. Поэтому, атомная энергетика занимает лидирующие позиции и пока эти позиции не уступит другим видам энергии [1, 8].

Одним из решений энергетической проблемы может стать активное развитие ядерной энергетики. Согласно прогнозам МАГАТЭ, к 2030 году на планете может быть построено до 600 новых энергоблоков (сейчас их насчитывается 440). На увеличении доли ядерной энергетики в мировом энергобалансе могут сказаться такие факторы, как надежность, приемлемый уровень затрат по сравнению с другими отраслями энергетики, сравнительно небольшой объем отходов, доступность ресурсов.

К основным преимуществам ядерной энергетики следует отнести:

огромную энергоемкость ядерного топлива;

возможность повторного использования топлива (после регенерации);

отсутствие парникового эффекта от ядерных энергетических установок.

Следует отметить, что ядерная энергетика лишена тех недостатков, которые имеются у альтернативных источников энергии. Так, затраты на производство солнечной батареи превышают все доходы от получаемой с ее помощью энергии. А, например, ветрогенераторы имеют невысокую мощность, высокую стоимость и экологические ограничения. Их размещение существенно изменяет ландшафт, а инфразвуковой шум, который они производят, опасен для людей и животных, что препятствует расположению ветрогенераторов вблизи населенных пунктов.

Поскольку атомная отрасль в нашей стране зародилась как военный проект, она имеет определенную специфику, требует повышенного уровня безопасности и режима нераспространения ядерных материалов и технологий. Ядерная энергетика получила самостоятельное развитие. Но нужно помнить, что и ядерные технологии оборонного комплекса России также непрерывно развиваются и совершенствуются, являются важнейшим сдерживающим фактором в противостоянии ядерных сверхдержав.

Цель работы – выявление закономерностей развития атомной отрасли России на основе анализа опубликованной информации и статистических данных, анализа современных угроз и уязвимостей. Исследование предполагает оценку роли атомной энергетики в мировом энергетическом балансе, анализ изменения структуры генерации и энергопотребления, в том числе, на фоне альтернативной энергетики, с учетом существующих и перспективных ядерных технологий, с учетом отечественных и зарубежных концепций безопасности (поколения I-IV энергетических ядерных реакторов). В работе также проведен обзор новых наиболее значимых атомных объектов – результатов современных отечественных достижений «мирного» атома (атомная отрасль – не только энергетика!), а также перечислены достижения отрасли в применении к военной и космической отраслям. Мотивация обзора – проиллюстрировать динамику развития атомной отрасли и ее текущее состояние, обозначить проблемы, предложить пути их решения, а также составить важнейшие рекомендации, определяющие ход развития отрасли с учетом решения задач повышения безопасности ядерных объектов, задач прогнозирования и предупреждения чрезвычайных ситуаций.

Методы исследований

Для каждого опасного объекта или производства (в том числе, инновационного) в общемировой практике принято проводить анализ безопасности, основанный на современных концепциях безопасности, на методах и методиках оценки риска, ущерба в случае аварии и безопасности объекта в целом – как на этапе создания проекта, так и при возникновении чрезвычайных ситуаций в ходе эксплуатации соответствующего объекта. В работе приведены ссылки на изученные и предложенные авторами подходы, используемые рабочие методики и методы.

Так, для инновационных проектов авторами разработана методика качественной и количественной оценки риска на основе данных анкетирования проектов и математических вероятностных методов [28], которая применима и для крупных проектов в атомной отрасли. А для оценки ущерба от радиационной аварии на плавучей атомной электростанции (ПАТЭС) авторы используют модель оценки ущерба, приведенную в действующей «Единой межведомственной методике оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера...» и модель оценки прогнозного предотвращенного ущерба [25]. Авторами также предложена модель системы поддержки принятия решений (СППР) по оценке риска аварий на потенциально опасных объектах, основанная на структурировании и оценке внутренних информационных потоков объекта [30]. В работе [41] построена модель защищенности при перегрузке ядерного топлива для реакторов типа ВВЭР, для критических элементов конструкции реактора вычисляется индекс защищенности, который введен с применением конструкционной теории надежности и вероятностных методов, авторами проведены расчеты. В работе [12] приведены принципы и методы повышения защищенности критически важных объектов (КВО) в системах управления, проанализированы основные угрозы и уязвимости.

Современное состояние и перспективы развития атомной энергетики в мире и в России. Доля атомной энергетики в мировом энергобалансе на сегодняшний день составляет около 17 %. По данным на 2014 г. в мире общая мощность энергетических реакторов составляла 377 ГВт [13], в настоящее время – уже 397 ГВт. Согласно оценкам экспертов МАГАТЭ, в настоящий момент в стадии строительства находится 55 энергоблоков, за период 2014–2020 гг. в мире будет построено до 130 новых энергоблоков, а суммарная мощность достигнет 430 ГВт. Это должно компенсировать выбывание старых энергоблоков и обеспечить повышение доли ядерной составляющей в мировом энергобалансе до 30 %. Текущее состояние наличия строящихся энергоблоков по странам (октябрь 2018 г.) приведено ниже (рис. 1), его предлагается сравнить с диаграммой за 2015 г. в [13]:

На рис. 2 приведено распределение действующих энергоблоков АЭС по странам. Следует отметить, что, в частности, крупнейшая энергетическая держава Китай запланировала интенсивное развитие ядерной энергетики, о чем свидетельствуют нынешние пятилетние планы КНР. В мае 2007 г. Государственный комитет по развитию и реформе Китая объявил, что к 2030 г. парк атомных станций КНР составит 160 ГВт.

В таких странах, как Россия, Китай, Индия, Республика Корея, США, Канада и Финляндия, разрабатываются и реализуются программы интенсивного развития ядерной энергетики. В Индии к 2020 году будут построены от 20 до 30 новых энергоблоков, а Китай собирается увеличить общую мощность до 50 гигаватт. По оценкам WNA (World Nuclear Association), общая мощность всех энергоблоков в мире к 2060 году достигнет по меньшей мере 1100 гигаватт, а учитывая современные темпы развития ядерной энергетики, эта цифра может достичь и 3500 гигаватт.

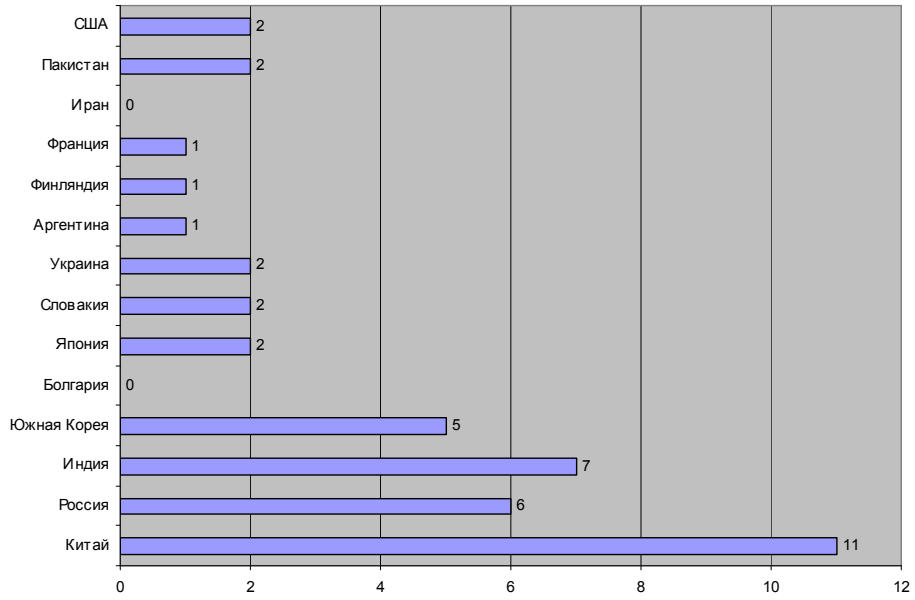


Рис. 1. Количество строящихся реакторов в мире по странам (октябрь 2018 г.)
Fig. 1. The amount of reactors under construction in the world by countries (October, 2018)

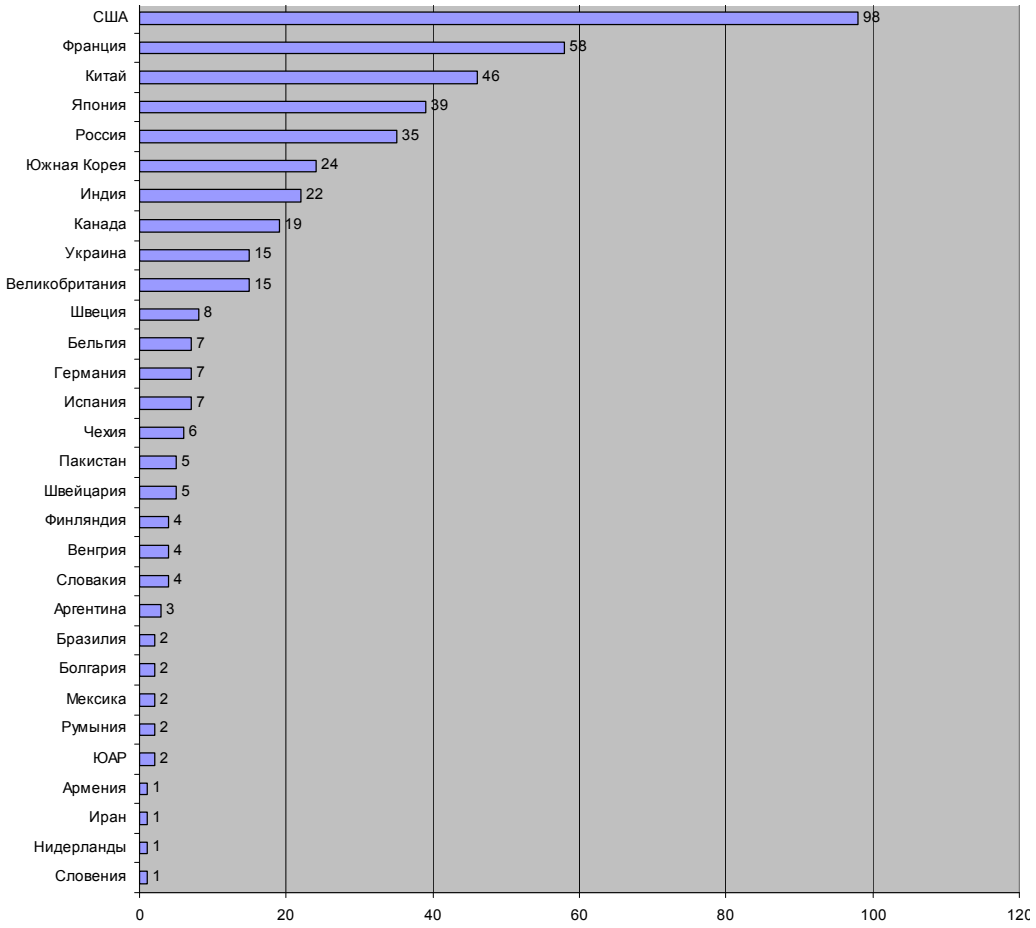


Рис. 2. Распределение действующих энергоблоков по странам (октябрь 2018 г.)
Fig. 2. The distribution of active power generating units by countries (October, 2018)

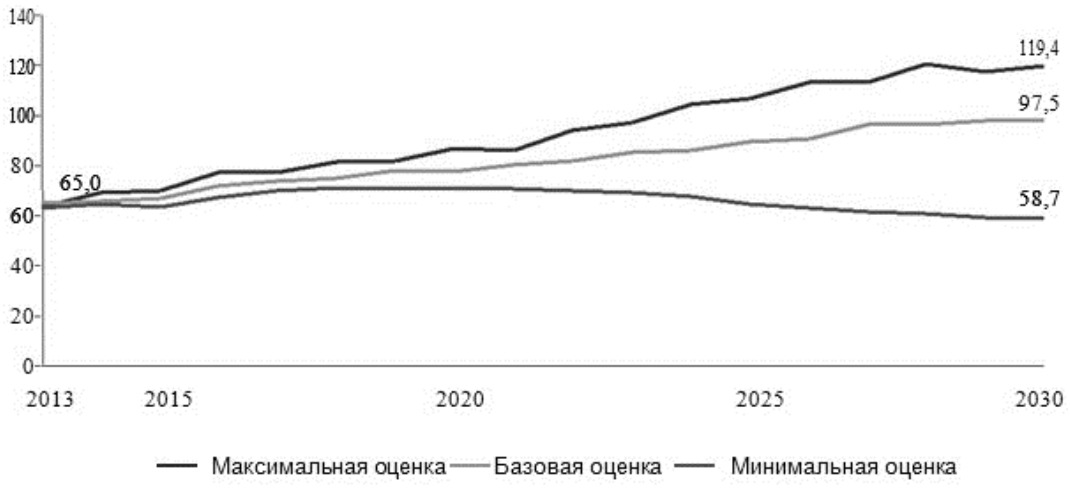


Рис. 3. Прогноз потребности в урановой руде до 2030 г.
Fig. 3. Demands in uranium ore forecast up to 2030

Всего в мире в стадии строительства находятся 55 новых энергоблоков (рис. 1), и до 2030 г., согласно наиболее скромным оценкам МАГАТЭ, планируется довести количество действующих энергоблоков до 600. На рис. 3 представлен прогноз потребности в урановой руде [14].

На сегодняшний день российская атомная отрасль представляет собой комплекс, в который входит более 360 предприятий и организаций, в которых занято свыше 250 тыс. человек. В структуре отрасли – крупные научно-производственные комплексы: предприятия ядерно-топливного цикла, атомной энергетики, ядерно-оружейного назначения и научно-исследовательские институты. Госкорпорация «Росатом» объединяет ряд предприятий атомной энергетики, а также предприятия ядерно-радиационной безопасности, ядерно-оружейного комплекса и фундаментальной науки.

Российская атомная отрасль является одной из передовых в мире по уровню научно-технических разработок в области проектирования реакторов, ядерного топлива, по опыту эксплуатации атомных станций, квалификации персонала АЭС. Предприятиями отрасли накоплен огромный опыт в решении масштабных задач, таких, как создание первой в мире атомной электростанции (1954 г.) и разработка топлива для нее. Россия обладает наиболее совершенными в мире обогатительными технологиями, а проекты атомных электростанций с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР) доказали свою надежность в процессе тысячи реакторо-лет безаварийной работы. Высокое качество выпускаемой продукции и предлагаемых услуг подтверждается успехами в международных тендерах на поставки ядерного топлива и строительство АЭС за рубежом.

В России имеется 35 действующих энергоблоков в составе 10 АЭС общей установленной мощностью более 29 ГВт (январь 2019 г.). Доля атомной энергетики в энергобалансе страны составляет более 16 %, к 2020 году планируется увеличить этот показатель до 25–30 %.

Еще в 2007 году (и ранее, см. [6, 7, 9]) по заданию Росатома была начата разработка «Стратегии развития атомной энергетики до 2050 года». В рамках этой задачи Ученым советом НИЦ «Курчатовский институт» в сентябре 2011 года были сформулированы основные положения стратегии развития ядерной энергетики России до середины века. В этих положениях учитываются основные позиции одоб-

ренной Правительством РФ «Энергетической стратегии России до 2030 года» и федеральных целевых программ развития атомного энергопромышленного комплекса.

Согласно положениям «Стратегии», для дальнейшего развития ядерной отрасли и созданию новых поколений ядерных установок необходимо реализовать задачу максимального уменьшения их исходной опасности путем обеспечения внутренней самозащищенности с последовательным осуществлением принципов глубокоэшелонированной защиты (ГЭЗ). Для обеспечения гарантий безопасности ядерной энергетики следует выработать и внедрить в практику России международные критерии защиты от внешних воздействий и стихийных бедствий, а также систему мер управления тяжелыми авариями для устранения их последствий.

Длительные сроки функционирования объектов ядерно-энергетического комплекса и принципиальная неопределенность ценовых показателей исключают возможность использования формальных экономических критериев как определяющего фактора привлекательности атомного кластера, но позволяют ориентироваться на оценку «сверху» приемлемых затрат через средние мировые затраты на первичную энергию. Согласно такой методике приемлемая для экономики России стоимость установленной мощности АЭС в настоящее время составляет около 2000 долл./кВт, а к 2030 году она увеличится до 4000 долл./кВт [2, 4, 5].

Исходные предпосылки этого положения иллюстрируются на рис. 4, где обозначен критический уровень 10 % в доле затрат на первичные энергоисточники от валового продукта в мировой экономике. Превышение этого уровня в 1980 году и в 2008 году сопровождалось общемировыми экономическими кризисами.

Что касается более свежих данных (2014 г.), доля капиталовложений в энергетику в целом достигает порядка 1,3 % от общемирового ВВП против 6 % от ВВП России [15].

Коммерческий заказ для ядерно-энергетического сектора экономики в перспективе ближайших десятилетий будет сосредоточен на усовершенствовании реакторов на тепловых нейтронах, в первую очередь технологии корпусных легководных реакторов с обеспечением мощностного ряда для потребностей регионального развития в стране и в мире. Объективную перспективу имеют энерготехнологические возможности высокотемпературных реакторов, в том числе в области безопасности. Требования мирового рынка к быстрому реактору, предназначаемому для массового строительства, еще не сформированы.

Рис. 4. Доля затрат на первичные энергоисточники от валового продукта в мировой экономике
Fig. 4. The energy sources expense ratio from gross product in the world economy

Структурные варианты развития ядерной энергетики, рассчитанные на установленную (с учетом экспортных поставок) мощность АЭС в 100 ГВт к 2030 году и 300 ГВт к 2050 г., с учетом ограничений по интегральному потреблению природного урана, его годовому потреблению и объему разделительных работ, демонстрируют необходимость серийного строительства быстрых реакторов с расширенным воспроизводством топлива ориентировочно с 2030 года.

Ожидается также появление так называемых *электроядерных энергетических установок* (*ЭЛЯУ*), *систем, управляемых ускорителем – Accelerator Driven System* (*ADS*) [31–37]. Эти системы представляют собой совместно работающий, как правило, подкритический ядерный реактор и ускоритель заряженных частиц (протонов или дейтронов). Демонстрационная электроядерная установка малой мощности 1 МВт, управляемая линейным ускорителем (14 МэВ), работает в ЦЕРНе (Швейцария) [32].

Мощный ускоритель при бомбардировке мишенной системы генерирует нейтроны, необходимые для поддержания реакции деления в ядерном реакторе, который может быть подкритическим. Это открывает возможность к использованию, например, ториевого топливного цикла для получения энергии из тория – элемента большой доступности. У подкритического реактора также исключена вероятность возникновения самоподдерживаемой цепной реакции (СЦР).

Связка «реактор-ускоритель» также позволяет осуществлять трансмутацию долгоживущих радионуклидов (актинидов) ОЯТ в короткоживущие продукты деления аналогично тому, как это происходит в реакторах-размножителях.

Задача построения промышленной ЭЛЯУ в мире еще не решена, хотя каждая из ядерных держав считает целесообразным развивать подобные проекты [31]. Построение промышленной ЭЛЯУ, совмещающей энергетический реактор и установку по переработке радиоактивных отходов, будет иметь, прежде всего, не экономический, а глобальный экологический эффект. Благодаря переработке высокоактивных отходов (ВАО) в низкоактивные (НАО), можно избавиться от необходимости иметь долгосрочные хранилища и могильники. Это позволит переработать накопленные РАО, планировать строительство малых по площади ХОЯТ, снизить площади уже занятых хранилищ ОЯТ, а в перспективе – рекультивировать территории и земли, задействованные под долгосрочные могильники. Данное обстоятельство способно придать атомной энергетики в целом большую безопасность и «экологичность».

Существующие и перспективные технологии реакторных установок различаются характеристиками топливоиспользования. Возможные прогнозы роста установленной мощности должны это обстоятельство учитывать.

Максимальный вариант установленной мощности (в электрическом эквиваленте), с учетом экспорта, который соответствует умеренному сценарию МАГАТЭ:

2030 год – 100 ГВт(э);

2050 год – 300 ГВт(э).

Место ядерных энергоисточников в топливно-энергетическом комплексе страны определяется прежде всего экономичностью (конкурентоспособностью с другими видами топлива) и топливообеспеченностью.

Базовыми критериями выбора ядерных установок для развивающегося парка атомных станций являются:

практическая осуществимость;

экономическая и потребительская приемлемость;

обеспечение ядерной безопасности гражданского применения;

минимизация угрозы распространения ядерного оружия.

Для реакторов типа ВВЭР базовыми являются характеристики проекта АЭС-2006 (с

развитием для целей рыночной привлекательности в вариант ВВЭР-ТОИ-1200). Для эффективной работы в замкнутом топливном цикле необходимо создать (с внедрением после 2020 года) ВВЭР с кардинально улучшенным использованием топлива – ВВЭР-С (с коэффициентом воспроизводства до 0,8).

В ряду реакторов на быстрых нейтронах рассматриваются размножители БР-Р с высоким воспроизводством (КВ ~ 1,4), с умеренным воспроизводством ~1,2 (возможно БН-1200) и конверторы без расширенного воспроизводства БР-К (КВ ~ 1,05). При сооружении БР без расширенного воспроизводства возможна стартовая загрузка из обогащенного урана.

Все варианты развития могут быть сравнены со сценарием без переработки облученного ядерного топлива (открытый цикл) или со сценарием замыкания цикла только по урану-235.

В качестве основных ограничивающих критериев развития служат:

баланс природного урана (интегральные потребности и годовое потребление);

объемы разделительных работ.

Следует отметить, что с замыкание топливного цикла – строительство новых реакторов (быстрый реактор БР-Р, модернизированный реактор ВВЭР-С с коэффициентом воспроизводства до 0,8) и переход на основные генерирующие мощности на реакторах с воспроизводством топлива и с переработкой ОЯТ позволит осуществить значительную экономию природного урана, снизить долю высокоактивного ОЯТ при захоронении ядерных отходов.

Согласно последним данным, в России в настоящее время работают десять атомных электростанций суммарной установленной мощностью более 29 ГВт, имеющих 35 энергоблоков с реакторами разных типов. В их числе 18 энергоблоков с водо-водяными реакторами типа ВВЭР, 10 – с канальными реакторами типа РБМК, 3 – с канальными реакторами типа ЭГП-6 и 2 энергоблока с реакторами на быстрых нейтронах – БН-600 и БН-800.

Ежегодный экспорт электроэнергии из России составляет около 17 млрд. кВт·ч на сумму 640 млн. долл. США (данные за 2017 г.).

После крупных аварий на американской АЭС «Три Майл Айленд» и Чернобыльской АЭС на всех российских атомных электростанциях был выполнен комплекс мер, исключающих повторение таких тяжелых ситуаций. В настоящее время завершена модернизация и техническое перевооружение энергоблоков АЭС первого поколения, что позволило не только существенно повысить уровень их безопасности, но также дало возможность обеспечить продление проектного срока эксплуатации на 5–10 лет.

Несмотря сырьевую зависимость Российской экономики и стагнацию части отраслей промышленности, атомные электростанции работают достаточно устойчиво и надежно. Они поставляют в необходимых количествах более дешевую электроэнергию потребителям в регионах, наиболее удаленных от месторождений дешевого органического топлива.

Эксплуатационные показатели, характеристики безопасности и надежности АЭС также являются стабильно высокими. По большинству из них российские АЭС не уступают зарубежным.

Несмотря на значительную роль, которую играет атомная энергетика в мировом энергетическом балансе, наметились тенденции снижения ее доли в общем энергопроизводстве и сворачивания ядерных программ в некоторых развитых странах Запада. Негативное отношение к атомной энергетике в отдельных странах объясняется сохраняющейся потенциальной опасностью АЭС при тяжелых авариях с повреждением ядерного топлива в реакторе, проблемами накопления, переработки и окончательного захоронения радиоактивных отходов (РАО) и отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), которые еще до конца не решены.

Главными задачами, стоящими перед атомной энергетикой России на ближайший период, являются обеспечение высокого уровня

безопасности АЭС и поддержание достигнутого уровня производства электроэнергии с последующим ростом. Для реализации этих задач необходимо завершить техническое перевооружение и модернизацию энергоблоков АЭС первого поколения для повышения безопасности и продления срока их службы, а также вывод из эксплуатации тех энергоблоков, срок службы которых с учетом продления завершается. Необходимо строительство современных энергоблоков (условно реакторы 2-го поколения и выше). Примеры АЭС, на которых идет строительство современных энергоблоков: Курская АЭС-2 (энергоблоки №2-1 и №2-2 ВВЭР-ТОИ), Ленинградская АЭС-2 (энергоблок №2-2 ВВЭР-1200), Нововоронежская АЭС-2 (энергоблок №7 ВВЭР-1200) – рис. 5.

Новый реактор ВВЭР-1200 разрабатывался в рамках проекта «АЭС-2006», первый энергоблок данного типа на Нововоронежской АЭС был включен в энергосистему России в августе 2016 г. Получило распространение множество различающихся проектов реакторных установок на основе реактора ВВЭР-1200 – также на Ленинградской АЭС-2, на Балтийской АЭС, на Белорусской АЭС и др.

АЭС на основе ВВЭР-1200 характеризуются повышенным уровнем безопасности, позволяющим отнести их к поколению «3+». Это достигнуто внедрением новых «пассивных систем безопасности», которые способны функционировать без вмешательства операторов даже при полном обесточивании станции. На энергоблоке №1 Нововоронежской АЭС-2 в качестве таких систем применены система пассивного отвода тепла от реактора, пассивная система каталитического удаления водорода и ловушка расплава активной зоны. Другой особенностью проекта стала двойная защитная оболочка, в которой внутренняя оболочка предотвращает утечку радиоактивных веществ при авариях, а внешняя оболочка противостоит природным и техногенным воздействиям, таким как, например, смерчи или падение самолета.

Энергоблок с реактором ВВЭР-ТОИ (водо-водяной энергетический реактор типовой оптимизированный информационный) поколения «3+» – типовой проект инновационного энергоблока, который создавался как основа проектов серийного строительства атомных станций на площадках с широким диапазоном природно-климатических условий, в расчете на весь спектр внутренних экстремальных и внешних техногенных воздействий. Проект энергоблока разрабатывается таким образом, чтобы его последующее применение не требовало изменений основных концептуальных, конструктивных и компоновочных решений, а также не требовало проведения дополнительных анализов безопасности и дополнительных обосновывающих документов, представляемых в государственные надзорные органы.

Рис. 5. Слева – 2-й энергоблок Курской АЭС-2 с реактором типа ВВЭР-ТОИ (15.04.2019 г.), справа – строящийся 2-й энергоблок Ленинградской АЭС-2 с реактором ВВЭР-1200 (02.04.2019 г.)

Fig. 5. To the left – 2nd power unit of Kurskaya NPP-2 with WWER-TOI (15.04.2019), to the right – 2nd power unit of Leningradskaya NPP-2 with WWER-1200 (02.04.2019)

О поколениях реакторов атомных станций. Как известно, исторически сформировалось 4 поколения реакторных установок (РУ) [16], см. рис. 6. Исследователи также говорят и о реакторах 5-го поколения, как правило, как о гипотетических конструкциях, обладающих «абсолютной» безопасностью. Чаще всего, в этом случае речь идет о реакторах без вредных выбросов в окружающую среду и радиоактивных отходов, что теоретически способен, например, обеспечить замкнутый топливный цикл.

В СССР произошло первое деление поколений: АС, построенные до вступления в силу правил ОПБ-73, отнесли к первому поколению, а последующие – ко второму. После выхода ОПБ-73 стали рассматривать так называемые *максимальные проектные аварии* с разгерметизацией трубопроводов больших диаметров.

Авария на Три-Майл-Айленд не особенно повлияла на советскую концепцию безопасности в следующей редакции (ОПБ-82), хотя стимулировала научные исследования процессов, которые наглядно проявились: аварии с малой течью, аварийный залив активной зоны, процессы в разнообразных системах безопасности и т. п. На совершенствование представлений о безопасности в СССР в этот период большее влияние оказало сооружение АЭС «Ловииза» по советскому проекту и обоснование его перед регулирующим органом Финляндии. Это время удачно совпало с взрывным ростом компьютерной техники в мире, чем обусловлено системное развитие и у нас в стране детерминистских и вероятностных методов расчета.

Произошедшая в 1986 г. Чернобыльская катастрофа глобальным образом повлияла на концепцию безопасности АС во всем мире. Так, все проекты АС, выполнявшиеся после Чернобыля в соответствии с ОПБ-88, стали относить *к третьему поколению*. Впоследствии, после вступления в силу Федерального закона «Об использовании атомной энергии» от 21.11.1995 г. № 170-ФЗ появилась редакция ОПБ-88/97, в которой содержались косметические изменения предыдущего текста.

Таким образом, 1986 г. послужил той вехой, от которой начинается отсчет развития требований по безопасности реакторов 3-го поколения, в частности, когда впервые был введен термин «*культура безопасности*», возникший в ходе западной критики отечественных реакторов РБМК.

Уже после аварии на Фукусиме (март 2011 г.) концепция безопасности АС все же была усовершенствована в разделе [17] «Основные критерии и принципы обеспечения безопасности». Тем не менее, оснований для провозглашения перехода к следующему поколению эти изменения не дали.

В современной литературе последних лет также можно найти упоминания о поколении 3+, которое связывается с требованием исключения эвакуации населения при любых, даже самых тяжелых авариях.

Однако подход к определению 4-го поколения РУ, по мнению автора в [16], требует существенного отличия идеологии безопасности от действующей для трех устоявшихся поколений РУ. Возможное развитие подобной идеологии было предложено в [18], где впервые была введена концепция реактора с «естественной» безопасностью, смысл которой идентичен понятию *внутренняя самозащищенность* (в иностр. лит. – *inherent safety*) РУ – свойство обеспечивать безопасность на основе естественных обратных связей, процессов и характеристик – понятию уже введенному в [17]. Опыт происшедших аварий, как показано в [19], свидетельствует о недостаточности мер и барьеров глубоко эшелонированной защиты для объектов с такой огромной концентрацией энергии, как атомная. В частности, будущее атомной энергетики связывается не с сооружением конверсионных реакторов, приспособленных для мирного использования, а с конструированием принципиально новых реакторов, изначально предназначенных для энергетики.

Таким образом, безопасность РУ будущего должна обеспечиваться не за счет реализации

барьеров глубокоэшелонированной защиты, а за счет «последовательной реализации свойства внутренней защищенности РУ».

Следует отметить принципиальное отличие российских подходов от возникшего в 2000 г. международного проекта «Поколение IV» или GIV. Его рождение определялось не столько научными, сколько политическими целями, желанием США вовлечь некоторые страны в сферу влияния собственных намечаемых технологий. Во всяком случае, в настоящее время к реакторам, отнесенным к GIV, предъявляются требования к их безопасности, которые трудно назвать конкретными [20]: высокий уровень безопасности и надежности, низкая вероятность повреждения активной зоны, исключение мероприятий аварийного реагирования за пределами площадки АС. Последнее требование по существу такое же, как для поколения 3+.

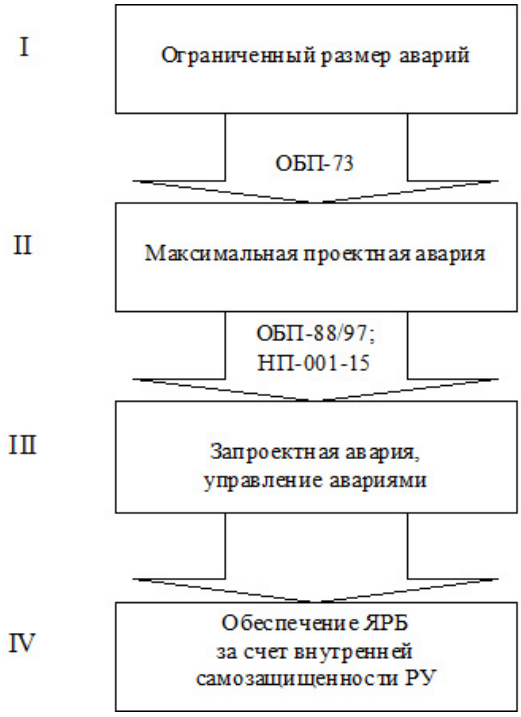


Рис. 6. Схема развития поколений (I–IV) реакторов атомных станций

Fig. 6. The development of nuclear energy reactors generations (I–IV) scheme

О реакторах с замкнутым топливным циклом. Современная атомная энергетика базируется главным образом на реакторах открытого топливного цикла, работающих на тепловых нейтронах, которые используют около 1 % добываемого урана. Поэтому экономически приемлемые запасы урана могут обеспечить топливом атомную энергетику достигнутого уровня не более чем на 100 лет. В настоящее время в России не реализован в полной мере замкнутый топливный цикл: ведется переработка отработавшего ядерного топлива с ВВЭР-440 и судовых ядерных установок с последующим использованием регенерированного урана в реакторах РБМК. Важнейшей задачей является переход к полному замкнутому топливному циклу и радиационно-эквивалентному захоронению радиоактивных отходов.

Топливная база крупномасштабной атомной энергетики должна быть основана на воспроизводстве и повторном использовании всех делящихся ядерных материалов, а следовательно, замкнутый топливный цикл является обязательным условием для развития крупномасштабной атомной энергетики XXI в. Ее стратегическая целесообразность основана на:

практически неограниченных ресурсах ядерного топлива (с учетом внедрения замкнутого топливного цикла и реакторов-размножителей на быстрых нейтронах);

экономических преимуществах атомной энергетики по сравнению с традиционной теплоэнергетикой;

экологических преимуществах, заключающихся в отсутствии выбросов продуктов сгорания органического топлива.

Кроме того, следует отметить, что атомные электростанции служат основой Единой энергетической системы страны, особенно в энергозонах Северо-Запада и Центра России, так как мощные АЭС – Ленинградская, Смоленская, Курская, Калининская, Балаковская и Нововоронежская – являются узловыми и во многом определяют структуру высоковольтных линий электропередачи.

Об отечественных инновационных реакторах Брест-300. Брест-300 – разрабатывающийся с конца 80-х гг. по настоящее время в России проект реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем, двухконтурной схемой отвода тепла к турбине и закритическими параметрами пара. В декабре 2015 года было получено государственное разрешение на строительство реактора. Проведя соответствующие подготовительные работы и эксперименты, Росатом запланировал на 2019 г. начало строительства реактора по проекту БРЕСТ-ОД-300 (опытный демонстрационный) в качестве составной части проекта «Прорыв», консолидирующего разработки реакторов большой мощности на быстрых нейтронах, технологии замкнутого ядерного топливного цикла, а также технологии новых видов топлива и материалов, ориентированные на достижение нового качества ядерной энергетики. Электрическая мощность энергоблока в 300 МВт (тепловая мощность – 700 МВт) была выбрана как минимально необходимая для получения коэффициента воспроизводства топлива в активной зоне, равного единице. В проекте имеются спорные моменты, которые вызывают множество дискуссий и критики, а предложенные технические решения требуют соответствующего обоснования [21].

О термоядерном синтезе. Наряду с развитием ЯЭ на основе реакторов деления продолжаются исследования возможности использования реакций синтеза легких ядер и реакций глубокого расщепления тяжелых ядер для выделения энергии и получения искусственного ядерного топлива. В течение последних десятилетий наблюдается значительный прогресс в реализации концепции управляемого термоядерного синтеза (УТС), в первую очередь на основе замкнутых магнитных ловушек – *токамаков*. На крупных физических установках этого типа достигнуты температуры и давления плазмы, необходимые для термоядерного горения. Для практического осуществления этого шага Россия, Европа, США и Япония объединили свои научные, технические и финансовые усилия для совместной разработки технического проекта первого в мире экспериментального термоядерного реактора, получившего название ИТЭР (*ITER – International Thermonuclear Experimental Reactor*) [3], который будет построен во Франции.

Проект ИТЭР [3, 38–40] основан на многолетних исследованиях возможности магнитной термоизоляции высокотемпературной плазмы с поддержанием термоядерной реакции синтеза в стационарном режиме. Для устойчивой управляемой реакции выход энергии синтеза должен быть близок к энергозатратам на поджиг плазмы. Существующие в мире токамаки, предшествующие проекту ИТЭР, способны удерживать высокотемпературную плазму, но не на достаточно длительный период времени, необходимый для промышленной генерации энергии. ИТЭР – первая промышленная установка управляемой реакции синтеза мощностью 500 МВт. В то же время реактор ИТЭР – это лишь первый шаг на пути освоения человечеством управляемого термоядерного синтеза.

В проект вложены колоссальные средства (бюджет – 20 млрд. долларов). Первоначальный вариант реактора позволит осуществить поджиг плазмы разрядом, который будет длиться 300 секунд. В случае удачно проведенных экспериментов будут создаваться последующие версии реактора (DEMO1, DEMO2), работающие на непрерывном разряде, предположительно, порядка 2 часов.

Согласно последней информации (конец 2018 г.), строительство Международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР завершено на 60 %. На площадку прибывают основные компоненты проекта, а в 2020 г. начнется полномасштабный процесс сборки.

Новые объекты атомной энергетики – исследовательские реактор «ПИК». В последнее время в России появляются новые объекты атомной энергетики. В частности, завершено строительство первого исследовательского реактора «ПИК» в Петербургском институте ядерной физики (ПИЯФ) им. Б.П. Константинова в г. Гатчина под Санкт-Петербургом [22, 23]. Тепловая мощность реактора составляет 100 МВт. Реактор отличает от зарубежных проектов других подобных исследовательских установок повышенная плотность нейтронного потока – ее максимальное значение составляет $5 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$·с$^{-1}$. Физический пуск реактора состоялся в феврале 2011 г., а энергетический пуск намечен на 2019 г.

Плавучая атомная теплоэлектростанция (ПАТЭС). Среди новых объектов атомной энергетики – плавучая атомная теплоэлектростанция (ПАТЭС) «Академик Ломоносов» [24]. Это первый в мире плавучий энергоблок (ПЭБ), не считая экспериментальных. Строительство и комплексные испытания ПЭБ были успешно завершены в апреле 2019 г. Строительство ПАТЭС начиналось на предприятии «Севмаш» (г. Северодвинск), парогенерирующие блоки для двух реакторов КЛТ-40с были изготовлены по проекту АО «ОКБМ Африкантов» на Балтийском заводе в Санкт-Петербурге. Реактор КЛТ-40с представляет собой отечественный судовой водо-водяной ядерный реактор тепловой мощностью 150 МВт (электрической – 35 МВт). Суммарная электрическая мощность обоих реакторных блоков составляет 70 МВт. В августе–сентябре 2019 г., когда будет закончена работа по строительству мол-причала и береговых сооружений, планируется передислокация ПЭБ на побережье Чукотки для снабжения тепловой и электрической энергией близлежащих портовых городов, а также нефтяных и газовых платформ, расположенных в открытом море. Подходы к оценке возможного ущерба в случае возникновения радиационной аварии на ПАТЭС изложены в [25].

Ядерные энергетические установки для космических аппаратов. Разработки ядерных энергетических установок для космических аппаратов, ядерных ракетных двигателей (ЯРД) проводились в СССР еще в 60-х гг. XX в. Хорошо известны советские разведывательные космические аппараты-спутники. Например, на спутниках «УС-А», используемых в 60–80-х гг. прошлого века, была установлена ядерная энергетическая установка (ЯЭУ) БЭС-5 «БУК». Электрическая мощность установки составляла 3 кВт, тепловая – 100 кВт. Максимальный ресурс работы энергетической установки не превышал 135 суток. Испытания и эксплуатация подобных установок не всегда завершались успешно, что приводило к загрязнению атмосферы радиоактивными веществами, к загрязнению космических орбит при захоронении выведенных из эксплуатации реакторов.

В СССР было создано несколько типов энергетических установок для космоса. Выпуск подобных космических аппаратов был прекращен в 1988 г. – в частности, после Чернобыльской аварии, когда США и СССР выдвинули совместное предложение по запрещению использования ядерной энергии в космосе. Это предложение не получило формальных последствий, однако с тех пор запуски космических аппаратов с ядерными энергетическими установками на борту не проводились [26].

В настоящее время в России запланировано строительство летного образца космического аппарата с ядерной энергодвигательной установкой (ЯЭДУ) – инновационный проект Федеральной космической программы (ФКП) на 2016–2025 гг, совместно разрабатываемый Роскосмосом и предприятиями Росатома [27].

Использование мегаваттного реактора в ЯЭДУ как перспективного источника энергии в космосе сделает возможными дальние (межпланетные) космические экспедиции, которые столь необходимы при освоении космоса.

Для реактора новой конструкции в ЯЭДУ предложен подход, при котором энергия ядер-

ного топлива преобразуется сначала в электрическую, а последняя, в свою очередь, питает плазменный двигатель. При этом удельная тяга плазменного двигателя – в 20 раз выше, чем у химических реактивных двигателей. Преимущество перед прямоточным ядерным двигателем заключается в том, что через реактор проходит не реактивная струя водорода, как в прямоточном двигателе, а другое рабочее тело – инертный газ, нагретый до 1500°, «циклирующий» в замкнутом контуре реактора. Кроме того, нет необходимости нагревать водород до запредельных значений, что упрощает проведение испытаний двигателя. Все испытания можно провести на территории России, не вступая в длительные переговоры по использованию ядерной энергии за пределами своего государства.

Основные затраты и финансовые показатели проекта представлены в открытом доступе. Для проведения всесторонней оценки риска подобных инновационных проектов удобно применять подходы и авторское программное обеспечение, описанное в [28].

Ядерные технологии в оборонном комплексе. Нужно помнить, что атомная отрасль определяет также и вектор развития своего «военного» двойника – ядерного «щита» России, являющегося важнейшим миротворческим элементом – сдерживающим фактором в противостоянии ядерных сверхдержав.

Президент России Владимир Путин в обращении к Федеральному собранию 1 марта 2018 г. объявил о создании в стране новейших стратегических систем вооружения, представленных как ответ на строительство Соединенными Штатами системы противоракетной обороны, а, в последствии, как оказалось, и как ответ на выход США из договора ДРСМД (февраль 2019 г.).

Обнародованная Президентом межконтинентальная крылатая ракета неограниченной дальности снабжена малогабаритной сверхмощной ядерной энергетической установкой. Президент упомянул, что параметры ракеты сравнимы с ракетами «Томагавк» и «Х-101». Ракета получила кодовое название «Буревестник».

Решение о начале разработки «Буревестника» было принято еще в декабре 2001 г., после выхода США из Договора об ограничении систем противоракетной обороны 1972 г. Конструкция энергетической установки является продолжением давних разработок СССР, в то же время является новейшим военным проектом, не имеющем зарубежных аналогов. От проектов ядерных реактивных двигателей открытого типа (рабочее тело нагревается ядерным реактором) для ракет и самолетов, как известно, в США и в СССР в 60-х гг. XX в. отказались ввиду существенного загрязнения окружающей среды и их дороговизны – в пользу обычных реактивных двигателей.

В новой отечественной ракете – два двигателя: стартовый двигатель ракеты – твердотопливный, а маршевый двигатель – ядерный воздушно-реактивный. Что касается габаритов: длина на старте – 12 м, в полете – 9 м, корпус во фронтальной проекции имеет эллиптическую форму 1×1,5 м. В «Буревестнике» используется прямоточная газовая турбина открытого типа, мощность двигателя оценивается приблизительно в 766 кВт.

Согласно данным ТАСС, ракета комплекса является дозвуковой. Траектория полета с учетом чрезвычайно продолжительного времени маневрирования, согласно замыслу разработчиков, обеспечивает возможность преодоления рубежей ПВО и ПРО. По официально неподтвержденным данным, в январе 2019 г. прошли успешные испытания ядерной энергетической установки для крылатой ракеты комплекса «Буревестник».

Безопасность объектов атомной энергетики и их конкурентоспособность. Повышение требований к безопасности объектов атомной энергетики и необходимость обеспечения их конкурентоспособности, в частности, за счет

уменьшения численности эксплуатационного персонала ставят на повестку дня совершенствование систем автоматизации, управления и контроля [8].

В частности, для атомных станций, оптимальный уровень автоматизации и функциональная и аппаратно-техническая полнота автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) определяются в значительной мере качеством и надежностью средств автоматизации. Отечественные АЭС по уровню и качеству систем автоматизации существенно уступают современным зарубежным станциям.

В качестве перспективного направления совершенствования АСУ ТП следует рассматривать применение отказоустойчивых высокопроизводительных вычислительных систем, обеспечивающих повышенное качество диагностики и прогнозирования состояния узлов и элементов оборудования, более надежную аварийную защиту, а также, оптимальный уровень взаимодействия «человек-машина». Комплекс технических средств при этом будет существенно проще и компактнее за счет перехода на новое поколение интегральных схем и компонентов и отказа от аппаратного исполнения систем функционально-группового управления.

Повышение надежности оборудования и компонентов АЭС, от которой в значительной степени зависит предотвращение развития наиболее неприятных аварийных ситуаций, связано со своевременным обнаружением дефектов в материалах конструкции. Сегодня наиболее освоены акустически-эмиссионные методы контроля состояния металлов конструкции, метод шумовой высокочастотной диагностики.

Особая проблема, также имеющая отношение к эксплуатации АЭС, связана со снятием с эксплуатации энергоблоков, исчерпавших свой ресурс.

Наряду с повышением надежности оборудования, с повышением уровня автоматизации, следует также назвать разработку мер, предотвращающих или компенсирующих ошибочные действия персонала в аварийных режимах и чрезвычайных ситуациях.

Одним из важнейших аспектов безопасности и предупреждения аварий в будущем является разработка инженерных методов и методик оценивания безопасности ядерных реакторов в аварийных режимах работы.

Таким образом, ставятся задачи совершенствования систем мониторинга, систем управления подсистемами АЭС как критически важными объектами [10–12, 41], задачи создания и внедрения математических моделей поддержки управленческих решений [30].

Заключение

За всю историю развития атомной отрасли в мире накоплен огромный потенциал самых различных разработок и используемых инновационных подходов в атомной энергетике, в реакторостроении, в применении ядерных технологий в оборонном комплексе. Отметим, что Россия находится на передовых позициях как в вопросах обороноспособности, так и в применении мирного атома, а также способна занять ведущую роль в мировом сообществе при разделении труда в современном технологическом укладе, в решении насущных проблем, накопившихся в отрасли, в решении проблемы нехватки энергетических ресурсов, а также глобальных экологических проблем. Для этого необходимо внедрение в отрасль передовых физических принципов, освоение реакторов новых типов, внедрение новых технологий для совершенствования систем мониторинга, систем управления и систем безопасности критически важных объектов. Несмотря на все сложности в экономике, на постоянное перекладывание сроков реализации крупных проектов, на неблагоприятный военно-политический фон, на усугубившуюся террористическую опасность международного характера, имеющийся научно-технологический задел позволяет нашей стране с уверенностью смотреть в будущее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Воронин Л.М.** Перспективы развития атомной энергетики России в XXI веке. URL: http://www.wdcb.ru/mining/articls/art_3/perspect.html (дата обращения: 31.03.2019).

[2] **Гагаринский А.Ю., Велихов Е.П., Субботин С.А., Цибульский В.Ф.** Энергетика в экономике 21 века. РНЦ «Курчатовский институт». URL: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/050/43050825.pdf (дата обращения: 31.03.2019).

[3] Энергетика будущего. Международный проект ИТЭР / под ред. академика Е.П. Велихова. М.: УТС-Центр, 2005.

[4] **Велихов Е.П.** Энергетика в экономике мира XXI века // Труды МФТИ. 2011. Т. 3, № 4. С. 6–15.

[5] **Цибульский В.Ф.** Энергетический индикатор состояния экономики. Открытый семинар «Экономические проблемы энергетического комплекса» (семинар А.С. Некрасова). М.: Изд-во ИНП РАН, 2013.

[6] **Курчатов И.В., Александров А.П.** О стратегии ядерного энергетического развития: сб. М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2013. 144 с.

[7] Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. Основные положения. Министерство Российской Федерации по атомной энергии. М.: 2000.

[8] Роль ядерной энергетики в современном мире. Безопасность и стоимость // ЮНИДО в России. 2011. № 4. URL: http://www.unido-russia.ru/archive/num4/art4_18/ (дата обращения: 31.03.2019).

[9] **Белогорьев А.М., Бушуев В.В., Громов А.И., Куричев Н.К., Мастепанов А.М., Троицкий А.А.** Тренды и сценарии развития мировой энергетики в первой половине XXI века / под ред. В.В. Бушуева. М.: ИД «ЭНЕРГИЯ», 2011. 68 с.

[10] **Гуменюк В.И., Гравит М.В., Атоян Г.Л., Попов В.Ю., Попов И.Ю.** Проблемы совершенствования систем мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций на объектах ядерной энергетики // Неделя науки СПбПУ: сб. докл. Научного форума с междунар. участием XLIII. СПб., 2014. С. 11–18.

[11] **Гуменюк В.И., Атоян Г.Л., Гравит М.В., Попов В.Ю., Попов И.Ю.** Разработка системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера по анализу объемной активности изотопов ксенона // Опыт ликвидации крупномасштабных чрезвычайных ситуаций в России и за рубежом: тез. докл. XIX Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. 2014. С. 100–101.

[12] **Гуменюк В.И., Федосовский М.Е., Атоян Г.Л.** Принципы и методы повышения защищенности систем управления критически важных объектов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2012. Вып. 147 (2). С. 209–225.

[13] **Гуменюк В.И., Гравит М.В., Сорокин Л.Н., Атоян Г.Л.** Перспективы развития ядерной энергетики России и проблемы безопасности // Неделя науки СПбПУ: матер. науч. форума с междунар. участием «Междисциплинарные секции и пленарные заседания институтов». 2015. С. 203–224.

[14] **Амирова У.К., Урузбаева Н.А.** Обзор развития мирового рынка урана // Universum: Экономика и юриспруденция: [электрон. научн. журн.]. 2017. № (39). URL: http://7universum.com/ru/economy/archive/item/4802

[15] Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года. Институт энергетических исследований Российской академии наук. Аналитический центр при Правительстве РФ. М., 2014. URL: https://www.eriras.ru/files/prognoz-2040.pdf

[16] **Гордон Б.Г.** О нумерации поколений ядерных реакторов. Дата: 31.01.2017. Тема: Безопасность и чрезвычайные ситуации. URL: http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=7293

[17] Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. ОПБ АС, НП-001-15. М.: НТЦ ЯРБ, 2016.

[18] **Орлов В.В., Аврорин Е.Н., Адамов Е.О. [и др.].** Нетрадиционные концепции АЭС с естественной безопасностью // Атомная энергия. 1992. Т. 72. Вып. 4.

[19] **Гордон Б.Г.** Безопасность ядерных объектов. М.: Изд. НИЯУ «МИФИ», 2014.

[20] An Integrated Safety Assessment Methodology (ISAM) for Generation IV Nuclear Systems, Risk and Safety Working Group (RSWG), June 2011. URL: https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/gif_rsgw_2010_2_isamrev1_finalforeg17june2 011.pdf

[21] БРЕСТ. Материал из Википедии – свободной энциклопедии. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%A0%D0%95%D0%A1%D0%A2

[22] Реактор ПИК. URL: http://www.pnpi.spb.ru/ustanovki/reaktor-pik

[23] ПИК (реактор). Материал из Википедии – свободной энциклопедии. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%98%D0%9A_(%D1%80%D0%B5%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80)

[24] Академик Ломоносов. Материал из Википедии – свободной энциклопедии. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Академик_Ломоносов

[25] **Зобнина Н.А., Зотова Л.Ю., Туманов А.Ю.** Оценка предотвращенного ущерба при радиационной аварии на ПАТЭС // Неделя науки СПбПУ: матер. науч. конф. с междунар. участием. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. С. 79–81.

[26] Реакторы ядерных энергетических установок для космических и летательных аппаратов. URL: https://www.ippe.ru/realized-projects/275-space-npp

[27] К 2025 году Россия построит космический аппарат с ядерным двигателем. URL: https://fishki.net/1816612-k-2025-godu-rossija-postroit-kosmicheskij-apparat-s-jadernym-dvigatelem.html

[28] **Туманов А.Ю.** Автоматизированная система количественной оценки риска инновационного проекта: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2006.

[29] Буревестник (крылатая ракета). Материал из Википедии – свободной энциклопедии. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Буревестник_(крылатая_ракета)

[30] **Туманов А.Ю.** Разработка системы поддержки принятия решения по оценке риска аварий на потенциально опасных объектах // Научно-технические ведомости СПбПУ. 2013. Вып. 2 (171). С. 289–299.

[31] **Кудинович И.В., Овсянников Д.А., Свистунов Ю.А., Головкина А.Г.** Электроядерные технологии и ядерная энергетика. СПб.: Изд-во ВВМ, 2014. 143 с.

[32] Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles. A Comparative Study. NEA publications and reports, 2002. URL: https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2002/nea3109-ads.pdf (дата обращения: 31.03.2019).

[33] **Won S. Park, Tae Y. Song, Byoung O. Lee and Chang K. Park.** A Preliminary Design Concept of the HYPER System // Journal of the Korean Nuclear Society. 2002. Vol. 34, no. 1. P. 42–59.

[34] Accelerator Driven Systems: Energy Generation and Transmutation of Nuclear Waste. Status report of IAEA, IAEA-Tecdoc-985, 1996.

[35] Status of accelerator driven systems research and technology development. – Vienna: International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-1766, 2015.

[36] **Francesco Venneri, Mark A. Williamson, Ning Li, Michael G. Houts, Richard A. Morley, Denis E. Beller, William Sailor & George Lawrence.** Disposition of Nuclear Waste Using Subcritical Accelerator-Driven Systems: Technology Choices and Implementation Scenarios // Nuclear Technology. 2000. 132:1. P. 15–29. DOI: 10.13182/NT00-A3126

[37] **Alex C. Mueller.** Transmutation of Nuclear Waste and the future MYRRHA Demonstrator. URL: https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1210/1210.4297.pdf

[38] ITER. From Wikipedia, the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/ITER

[39] **Matt Jewell.** ITER conductor design and (we hope) nuclear heating. URL: http://www.hep.princeton.edu/mumu/target/Jewell/jewell_041511.pdf

[40] **Tony Donné, Gianfranco Federici.** Overview of Design and R&D Activities towards a European DEMO. URL: https://www.iea.org/media/workshops/2016/fpccwebinar/Item_6_EUROPE.pdf

[41] **Гуменюк В.И., Атоян Г.Л., Сыров А.А.** Обеспечение защищенности и минимизация затрат при перегрузке ядерного топлива для реакторов типа ВВЭР // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. Вып. 2 (123). С. 294–302.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГУМЕНЮК Василий Иванович – *доктор технических наук профессор Высшей школы техносферной безопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*
E-mail: kaf-uzchs@mail.ru

ТУМАНОВ Александр Юрьевич – *кандидат технических наук доцент Высшей школы техносферной безопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*
E-mail: toumanov@mail.ru

АТОЯН Грант Левонович – *научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН*
E-mail: ato.bmg@gmail.com

Статья поступила в редакцию: 25.05.2019

REFERENCES

[1] **L.M. Voronin,** Perspektivy razvitiya atomnoy energetiki Rossii v XXI veke. URL: http://www.wdcb.ru/mining/articls/art_3/perspect.html (accessed March 31, 2019).

[2] **A.Yu. Gagarinskiy, Ye.P. Velikhov, S.A. Subbotin, V.F. Tsibulskiy,** Energetika v ekonomike 21 veka. RNTs «Kurchatovskiy institut». URL: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/050/43050825.pdf (accessed March 31, 2019).

[3] Energetika budushchego. Mezhdunarodnyy proyekt ITER. Pod red. akademika Ye.P. Velikhova. M.: UTS-Tsentr, 2005.

[4] **Ye.P. Velikhov,** Energetika v ekonomike mira XXI veka, Trudy MFTI, 3 (4) (2011) 6–15.

[5] **V.F. Tsibulskiy,** Energeticheskiy indikator sostoyaniya ekonomiki. Otkrytyy seminar «Ekonomicheskiye problemy energeticheskogo kompleksa» (seminar A.S. Nekrasova). M.: Izdatelstvo INP RAN, 2013.

[6] **I.V. Kurchatov, A.P. Aleksandrov,** O strategii yadernogo energeticheskogo razvitiya. Sbornik. M.: NITs «Kurchatovskiy institut», 2013.

[7] Strategiya razvitiya atomnoy energetiki Rossii v pervoy polovine XXI veka. Osnovnyye polozheniya. Ministerstvo Rossiyskoy Federatsii po atomnoy energii. M.: 2000.

[8] Rol yadernoy energetiki v sovremennom mire. Bezopasnost i stoimost, YuNIDO v Rossii, 4 (2011). URL: http://www.unido-russia.ru/archive/num4/art4_18/ (data obrashcheniya: 31.03.2019).

[9] **A.M., Belogoryev V.V. Bushuyev, A.I. Gromov, N.K. Kurichev, A.M. Mastepanov, A.A. Troitskiy,** Trendy i stsenarii razvitiya mirovoy energetiki v pervoy polovine XXI veka. Pod red. V.V. Bushuyeva. M.: ID «ENERGIYa», 2011.

[10] **V.I. Gumenyuk, M.V. Gravit, G.L. Atoyan, V.Yu. Popov, I.Yu. Popov,** Problemy sovershenstvovaniya sistem monitoringa i prognozirovaniya chrezvychaynykh situatsiy na obyektakh yadernoy energetiki, Nedelya nauki SPbPU sb. dokl. Nauchnogo foruma s mezhdunar. uchastiyem XLIII. SPb., (2014) 11–18.

[11] **V.I. Gumenyuk, G.L. Atoyan, M.V. Gravit, V.Yu. Popov, I.Yu. Popov.** Razrabotka sistemy monitoringa i prognozirovaniya chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera po analizu obyemnoy aktivnosti izotopov ksenona, Opyt likvidatsii krupnomasshtabnykh chrezvychaynykh situatsiy v Rossii i za rubezhom: tez. dokl. XIX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. po problemam zashchity naseleniya i territoriy ot chrezvychaynykh situatsiy. (2014) 100–101.

[12] **V.I. Gumenyuk, M.Ye. Fedosovskiy, G.L. Atoyan,** Printsipy i metody povysheniya zashchishchennosti sistem upravleniya kriticheski vazhnykh obyektov. St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 147 (2) (2012) 209–225.

[13] **V.I. Gumenyuk, M.V. Gravit, L.N. Sorokin, G.L. Atoyan.** Perspektivy razvitiya yadernoy energetiki Rossii i problemy bezopasnosti, Nedelya nauki SPbPU: mater, nauch, foruma s mezhdunar, uchastiyem «Mezhdistsiplinarnyye sektsii i plenarnyye zasedaniya institutov», (2015) 203–224.

[14] **U.K. Amirova, N.A. Uruzbayeva,** Obzor razvitiya mirovogo rynka urana, Universum: Ekonomika i yurisprudentsiya: elektron. nauchn. zhurn. 2017. № 6(39). URL: http://7universum.com/ru/economy/archive/item/4802

[15] Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii do 2040 goda. Institut energeticheskikh issledovaniy Rossiyskoy akademii nauk. Analiticheskiy tsentr pri Pravitelstve Rossiyskoy Federatsii. M., 2014. URL: https://www.eriras.ru/files/prognoz-2040.pdf

[16] Gordon B.G. O numeratsii pokoleniy yadernykh reaktorov. Data: 31.01.2017. Tema: Bezopasnost i chrezvychaynyye situatsii. URL: http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=7293

[17] Obshchiye polozheniya obespecheniya bezopasnosti atomnykh stantsiy. OPB AS, NP-001-15, M.: NTTs YaRB, 2016.

[18] **V.V. Orlov, Ye.N. Avrorin, Ye.O. Adamov [i dr.],** Netraditsionnyye kontseptsii AES s yestestvennoy bezopasnostyu, Atomnaya energiya, 72 (4) (1992).

[19] **B.G. Gordon,** Bezopasnost yadernykh obyektov. M.: Izd. NIYaU «MIFI», 2014.

[20] An Integrated Safety Assessment Methodology (ISAM) for Generation IV Nuclear Systems, Risk and Safety Working Group (RSWG), June 2011. URL: https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/gif_rsgw_2010_2_isamrev1_finalforeg17june2011.pdf

[21] BREST. Material iz Vikipedii – svobodnoy entsiklopedii. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%A0%D0%95%D0%A1%D0%A2

[22] Reaktor PIK. URL: http://www.pnpi.spb.ru/ustanovki/reaktor-pik

[23] PIK (reaktor). Material iz Vikipedii – svobodnoy entsiklopedii. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%98%D0%9A_(%D1%80%D0%B5%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80)

[24] Akademik Lomonosov. Material iz Vikipedii – svobodnoy entsiklopedii. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Akademik_Lomonosov

[25] **N.A. Zobnina, L.Yu. Zotova, A.Yu. Tumanov,** Otsenka predotvrashchennogo ushcherba pri radiatsionnoy avarii na PATES, Nedelya nauki SPbPU: mater. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiyem. SPb.: Izd-vo Politechnich. un-ta, (2018) 79–81.

[26] Reaktory yadernykh energeticheskikh ustanovok dlya kosmicheskikh i letatelnykh apparatov. URL: https://www.ippe.ru/realized-projects/275-space-npp

[27] K 2025 godu Rossiya postroit kosmicheskiy apparat s yadernym dvigatelem. URL: https://fishki.net/1816612-k-2025-godu-rossija-postroit-kosmicheskij-apparat-s-jadernym-dvigatelem.html

[28] **A.Yu. Tumanov,** Avtomatizirovannaya sistema kolichestvennoy otsenki riska innovatsionnogo proyekta: dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2006.

[29] Burevestnik (krylataya raketa). Material iz Vikipedii – svobodnoy entsiklopedii. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Burevestnik_(krylataya_raketa)

[30] **A.Yu. Tumanov,** Razrabotka sistemy podderzhki prinyatiya resheniya po otsenke riska avariy na potentsialno opasnykh obyektakh, St. Petersburg polytechnic university journal, 2 (171) (2013) 289–299.

[31] **I.V. Kudinovich, D.A. Ovsyannikov, Yu.A. Svistunov, A.G. Golovkina,** Elektroyadernyye tekhnologii i yadernaya energetika. SPb.: Izd-vo VVM, 2014.

[32] Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles. A Comparative Study. NEA publications and reports, 2002. URL: https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2002/nea3109-ads.pdf (accessed March 31, 2019).

[33] **Won S. Park, Tae Y. Song, Byoung O. Lee and Chang K. Park.** A Preliminary Design Concept of the HYPER Systemm, Journal of the Korean Nuclear Society, 34 (1) (2002) 42–59.

[34] Accelerator Driven Systems: Energy Generation and Transmutation of Nuclear Waste. Status report of IAEA, IAEA-Tecdoc-985, 1996.

[35] Status of accelerator driven systems research and technology development. – Vienna: International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-1766, 2015.

[36] **Francesco Venneri, Mark A. Williamson, Ning Li, Michael G. Houts, Richard A. Morley, Denis E. Beller, William Sailor & George Lawrence,** Disposition of Nuclear Waste Using Subcritical Accelerator-Driven Systems: Technology Choices and Implementation Scenarios, Nuclear Technology, 132:1 (2000) 15–29. DOI: 10.13182/NT00-A3126

[37] **Alex C. Mueller,** Transmutation of Nuclear Waste and the future MYRRHA Demonstrator. URL: https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1210/1210.4297.pdf

[38] ITER. From Wikipedia, the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/ITER

[39] Matt Jewell. ITER conductor design and (we hope) nuclear heating. URL: http://www.hep.princeton.edu/mumu/target/Jewell/jewell_041511.pdf

[40] **Tony Donné, Gianfranco Federici,** Overview of Design and R&D Activities towards a European DEMO. URL: https://www.iea.org/media/workshops/2016/fpccwebinar/Item_6_EUROPE.pdf

[41] **V.I. Gumenyuk, G.L. Atoyan, A.A. Syrov,** Obespecheniye zashchishchennosti i minimizatsiya zatrat pri peregruzke yadernogo topliva dlya reaktorov tipa VVER, St. Petersburg polytechnic university journal, 2 (123) (2011) 294–302.

THE AUTHORS

GUMENYUK Vasilii I. – *Higher School for Technosphere Safety of Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*
E-mail: kaf-uzchs@mail.ru

TOUMANOV Aleksandr Yu. – *Higher School for Technosphere Safety of Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*
E-mail: toumanov@mail.ru

ATOYAN Grant L. – *St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS*
E-mail: ato.bmg@gmail.com

Received: 25.05.2019

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019

DOI: 10.18721/JEST.25303
УДК 621.311 : 621.314 : 621.316 : 621.317

М.Г. Попов[1], О.А. Васильева[1], Д.Н. Асаинов[2]

1 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
2 – Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ТЭЦ НА БАЗЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

В статье представлены результаты исследований проблемы качества электроэнергии, электромагнитных переходных процессов системы электроснабжения энергетического комплекса Национального исследовательского университета «МЭИ». Приведенные в публикации практические примеры акцентированы на возможностях и эффективности применения цифровых технологий анализа режимов работы электрооборудования, которые реализуются в современных многофункциональных интеллектуальных устройствах BINOM3. Исследования показателей качества электрической энергии на ТЭЦ МЭИ выявили отклонения по 35-й гармонической составляющей напряжения. В результате физических экспериментов и цифровой обработки электрических сигналов установлено, что источниками искажений, вносимых во внешнюю электрическую сеть являются выпрямительные блоки, коммутируемые в схеме управления возбуждением турбогенератора. Эти схемы двух-(шести)-полупериодного выпрямления имеются в электромашинной системе возбуждения генератора с генератором постоянного тока – в цепях электромагнитного корректора и схеме токового компаундирования. На основе исследований и анализа электромагнитных и электромеханических переходных процессов на ТЭЦ МЭИ произведена оценка показателей качества электроэнергии в нестационарных режимах работы энергокомплекса. Установлено, что по чувствительности и быстродействию системы регулирования частоты, мощности и возбуждения турбогенератора полностью соответствуют требованиям ГОСТ 32144.

Ключевые слова: качество электрической энергии, система электроснабжения, цифровые технологии, интеллектуальные электрические сети, нестационарные режимы.

Ссылка при цитировании:
Попов М.Г., Васильева О.А., Асаинов Д.Н. Опыт внедрения цифровых технологий на ТЭЦ на базе многофункциональных измерительных приборов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 3. С. 47–58. DOI: 10.18721/JEST.25303

M.G. Popov[1], O.A. Vasilyeva[1], D.N. Asainov[2]

1 – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia
2 – Moscow power engineering institute, Moscow, Russia

EXPERIENCE OF INTRODUCING DIGITAL TECHNOLOGIES BASED ON MULTIFUNCTIONAL MEASURING METERS AT POWER STATION

The article presents the results of studies of the power quality problem, electromagnetic transients of the power supply system of the energy complex of the MPEI National Research University . The practical examples given in the publication are focused on the possibilities and efficiency of using digital technologies for analyzing the operating modes of electrical equipment which are implemented in modern

multifunctional intelligent devices BINOM3. Studies of the quality of electrical energy at the Power Station of MPEI revealed deviations in the 35th harmonic component of the voltage. As a result of physical experiments and digital processing of electrical signals, it was found that the sources of distortion introduced into the external electrical network are the rectifying blocks switched in the control circuit of the generator excitation. These schemes of two-(six)-half-period rectification are available in the electric machine excitation system of the generator with a DC generator, in the circuits of the electromagnetic corrector and the current compounding scheme. Based on research and analysis of electromagnetic and electromechanical transients at the Power Station of MPEI, indicators of power quality in non-stationary modes of operation of the power complex were assessed. It is established that the sensitivity and speed of the frequency control system, power and excitation of the turbine generator fully comply with the requirements of GOST 32144.

Keywords: power quality, power supply system, digital technologies, Smart Grid, non-stationary modes.

Citation:
M.G. Popov, O.A. Vasilyeva, D.N. Asainov, Experience of introducing digital technologies based on multifunctional measuring meters at power station, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 25 (03) (2019) 47–58. DOI: 10.18721/JEST.25303

Введение. В соответствии с программой развития цифровых технологий Единая энергетическая система (ЕЭС) России должна развиваться с учетом прогрессивных технологий самоконтроля, анализа и отчетности «интеллектуальных активно-адаптивных сетей» или «Smart Grid» (self-monitoring analysis and reporting technology). Концепция создания такого рода «умных» электрических сетей базируется на широком применении следующих технологических процессов:

– цифровизация (цифровое преобразование) физических (аналоговых) величин и данных;

– хранение больших массивов данных (Big Data), их цифровая обработка и оперативный экспресс-анализ;

– применение распределенных систем и ресурсов для хранения информации;

– внедрение технологий «искусственного интеллекта» для управления и оптимизации технологических процессов производства, распределения и потребления электрической энергии;

– применение мобильных технологий мониторинга и контроля состояния силового электрооборудования и энергообъекта в целом.

С развитием информационных технологий повышаются требования к наблюдаемости и достоверности оценки режимов работы электросетей и энергосистем. В частности, состояние одного трехфазного присоединения распределительного устройства может быть охарактеризовано более, чем 2000 параметров. При этом с учетом нормативных требований некоторые параметры должны усредняться на интервале 200 мс, а для оценки провалов напряжения, прерываний электроснабжения и перенапряжений – на полупериоде основной частоты. В целом для контроля (мониторинга состояния) одного электрического присоединения в течении 1 минуты требуется цифровая обработка более 600 000 измеренных (преобразованных) значений электрических сигналов.

Для обеспечения такой скорости цифровой обработки информации необходима специализированная архитектура системы контроля и мониторинга, в которой функции обработки, накопления, использования информации сосредоточены на полевом уровне, непосредственно у её источника (электрического присоединения) [1, 2]. Эта архитектура реализована в многофункциональных микропроцессорных средствах измерения и контроля показателей качества электрической энергии серии BINOM3 (Свидетельство об утверждении типа СИ RU.C.34541.A № 58154/1, регистрация в Государственном реестре СИ под № 60113-15).

Обеспечение интенсивного и безопасного развития электроэнергетической системы (ЭЭС) России с учетом новых требований возможно только при создании и наладке отечественного производства основных компонентов Smart Grid, а также при их постоянной производственной диагностике и развитии. Для этого требуется внедрение обновленных учебных программ и стандартов в профильных ВУЗах, обучение и повышение квалификации оперативного и эксплуатационного персонала энергосистем. Такое взаимодействие было осуществлено между ФГАОУ ВО «СПбПУ», ЗАО «Алгоритм» и ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», имеющего в своем административно-хозяйственном и оперативном управлении систему электроснабжения, включающую собственный источник генерации (ТЭЦ МЭИ), работающий параллельно центральной энергосистемой.

Основной **целью** этой работы является оценка показателей качества электроэнергии и эффективности действия систем управления возбуждением и мощностью турбогенератора в нестационарных режимах его работы, обусловленных аварийными событиями в системе электроснабжения энергокомплекса.

Описание методики и объекта исследований

На рис. 1 представлена упрощенная схема электроэнергетического комплекса ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» с указанием мест установки приборов BINOM3. В составе действующего паросилового блока находятся паровой котел типа БМ-35-РФ производительностью 50 т/ч, паротурбинная установка типа П-6-35(5М) с турбогенератором типа Т-6-2ЕУ3 мощностью 6 МВт. Турбогенератор выдает мощность на ГРУ напряжением 6,3 кВ, от которого осуществляется электроснабжение собственных нужд станции через ТСН1 и ТСН2 напряжением 6/0,4 кВ. Выдача мощности местному потребителю ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» осуществляется через повышающие трансформаторы ТС1 и ТС2 на шины напряжением 10 кВ распределительного пункта РП-10114. Связь с центральной энергосистемой осуществляется с помощью двух кабельных линий СБ-150, по которым выдается избыточная электроэнергия и производится резервирование электроснабжения местного потребителя. Штриховой линией на рисунке (в области КРУ 10 кВ) также отмечен второй строящийся энергоблок ПГУ на базе газотурбинной установки типа GPB 80D мощностью 7,5 МВт, котла-утилизатора типа КГТ 11,6-3,9-440, паротурбинной установки типа П 2,5/10,5-3,8/0,5 с турбогенератором ТПС-2,5-2ЕУ3.

С помощью приборов BINOM3 осуществляются измерения и контроль режимных параметров в цепи статора турбогенератора Г1, с номинальными напряжением 6,3 кВ и мощностью 6 МВт. Кроме этого производится мониторинг трансформатора ТСН1 со стороны 0,4 кВ. Алгоритмы измерений и статистической обработки ПКЭ реализованы в полном соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.7-2103 (IEC 61000-4-7:2009) и ГОСТ 30804.4.30-2103 (IEC 61000-4-30:2008).

Оценку искажений, вносимых во внешнюю электрическую сеть, и их влияние на показатели качества электрической энергии будем производить на основании спектрального анализа сигналов напряжения. При этом основное внимание будем уделять анализу высших гармонических составляющих.

Результаты исследований нестационарных режимов ТЭЦ МЭИ

На рис. 2 изображены экранные формы прикладного программного обеспечения с результатами цифровой обработки измерений, выполненных в период с 11 октября по 25 ноября 2018 года.

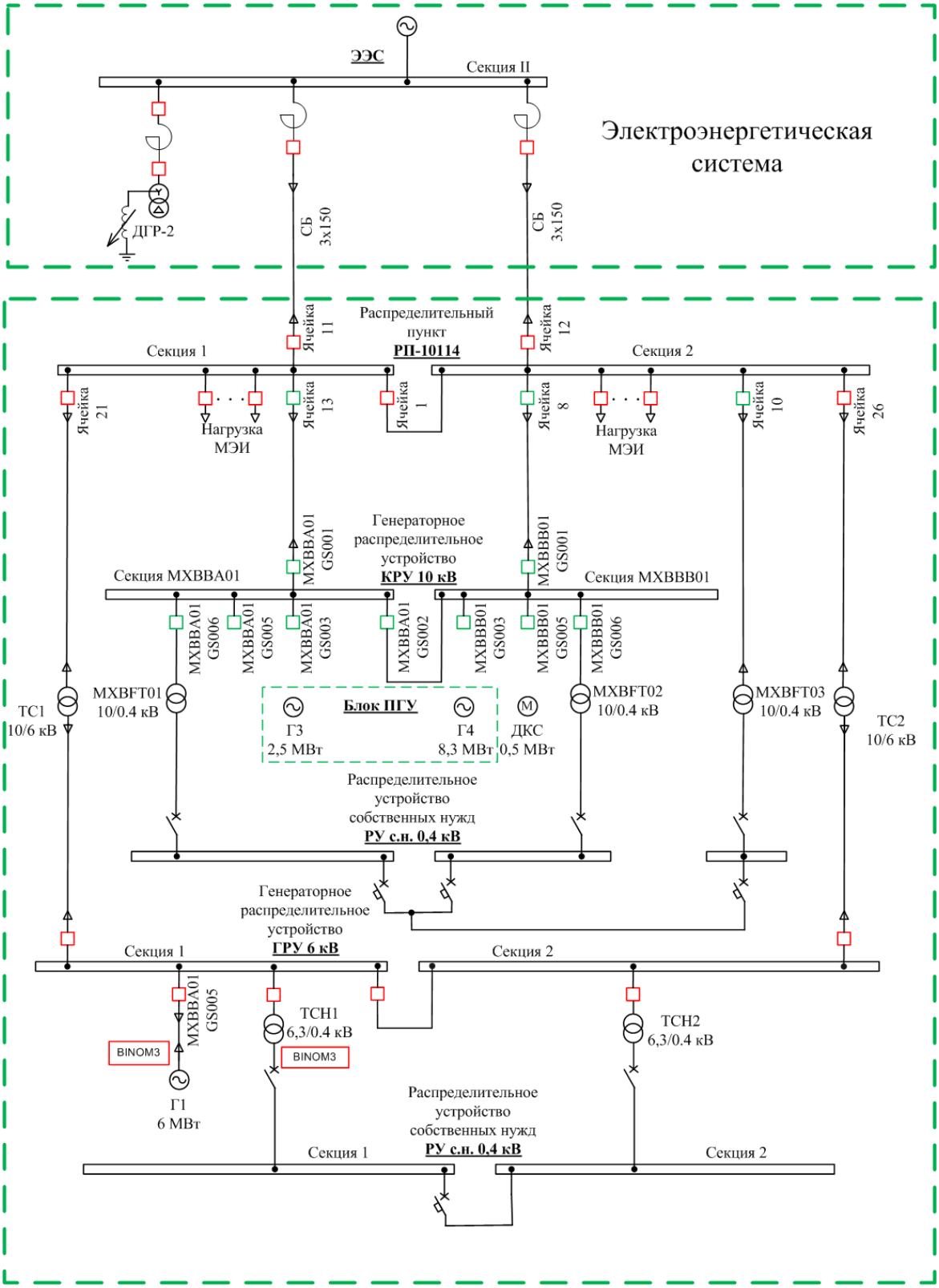
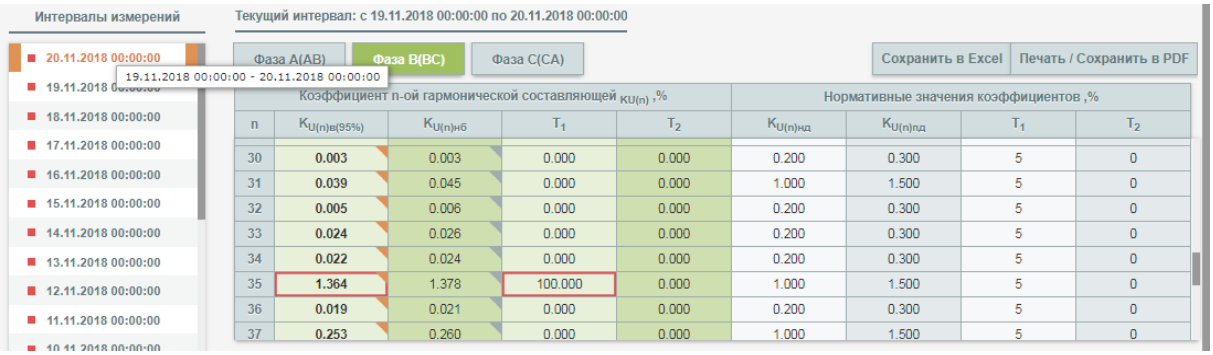


Рис. 1. Фрагмент главной схемы электрических соединений ТЭЦ МЭИ.
Fig. 1. Fragment of the main scheme of electrical connections of Power Plant of MPEI



n	$K_{U(n)в(95\%)}$	$K_{U(n)нб}$	T_1	T_2	$K_{U(n)нд}$	$K_{U(n)пд}$	T_1	T_2
30	0.003	0.003	0.000	0.000	0.200	0.300	5	0
31	0.039	0.045	0.000	0.000	1.000	1.500	5	0
32	0.005	0.006	0.000	0.000	0.200	0.300	5	0
33	0.024	0.026	0.000	0.000	0.200	0.300	5	0
34	0.022	0.024	0.000	0.000	0.200	0.300	5	0
35	1.364	1.378	100.000	0.000	1.000	1.500	5	0
36	0.019	0.021	0.000	0.000	0.200	0.300	5	0
37	0.253	0.260	0.000	0.000	1.000	1.500	5	0

Рис. 2. Результаты статистической обработки дискретного спектра ($K_{U(n)}$ – коэффициентов гармоник n-го порядка) сигналов фазных напряжений на шинах ГРУ 6 кВ

Fig. 2. Results of statistical processing of discrete spectrum ($K_{U(n)}$ – coefficients of n-th order harmonics) of phase voltage signals on 6 kV buses of generators

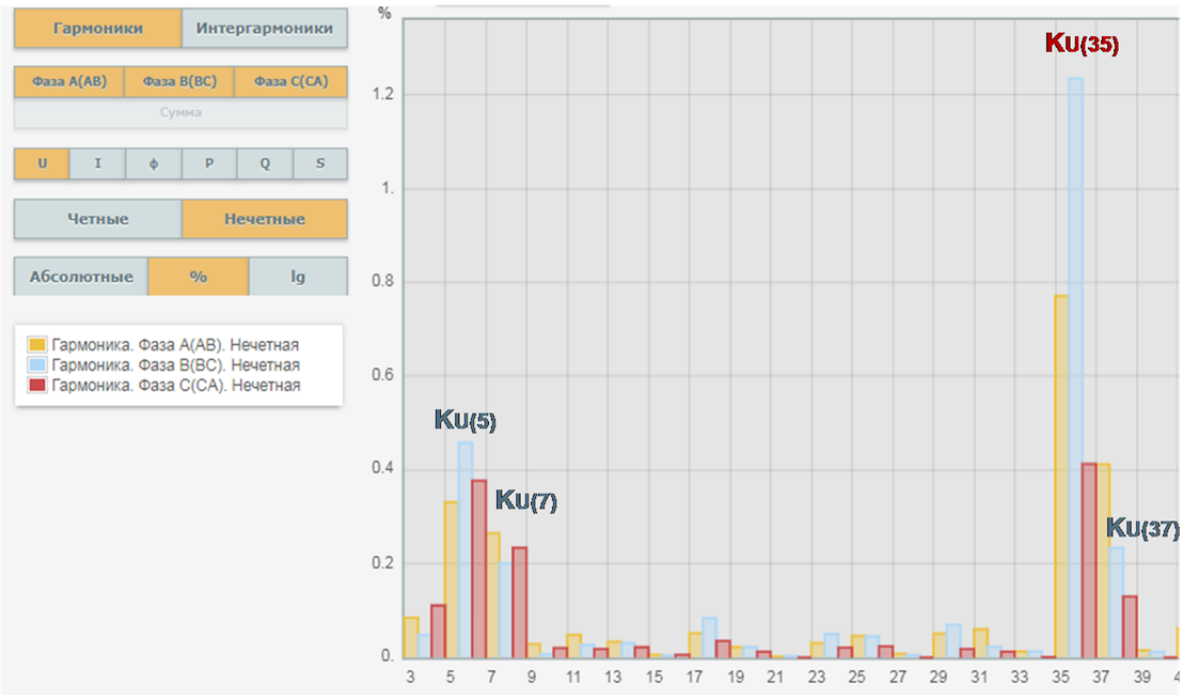


Рис. 3. Дискретный спектр фазных напряжений на выводах турбогенератора

Fig. 3. The discrete spectrum of the phase voltages at the terminals of the turbogenerator

В результате анализа показателей качества электроэнергии на шинах собственных нужд 0,4 кВ установлено, что качество электроэнергии полностью соответствует требованиям ГОСТ 32144. И, наоборот, на секции сборных шин ГРУ на всем интервале наблюдения (цифровой обработки) превышены нормативные значения (более 1 %) долевого содержания 35-й гармоники фазного (фазы B) напряжения, $K_{U(35)95\%} = 1{,}36$ % (рис. 2, выделенный фрагмент). При этом гармоники с 5-м и 7-м порядковыми номерами вносят значительно меньшие искажения (рис. 3) по сравнению с 35-й и 37-й гармоническими составляющими.

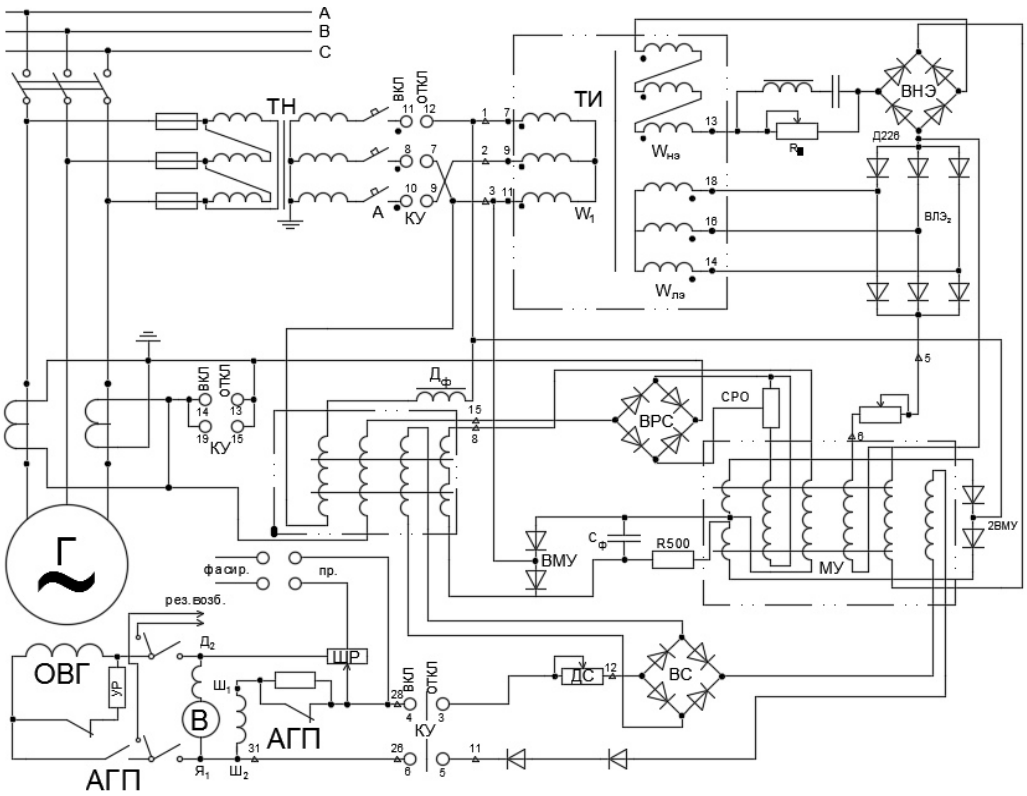


Рис. 4. Структура электромашинной системы возбуждения генератора ТЭЦ МЭИ с электромагнитным корректором.

Fig. 4. The structure of the electric excitation system of the generator of Power Plant MEI with electromagnetic corrector.

Выполненный сравнительный анализ показал, что источниками этих искажений, проявляющихся наличием гармоник порядков $n = 4k \pm 1$, $n = 6k \pm 1$ (где $k = 1, 2, ...$) [3–5], являются выпрямительные блоки с импульсными преобразователями. Такие схемы двух-(шести)-полупериодного выпрямления имеются в электромашинной системе возбуждения генератора с генератором постоянного тока (рис. 4) – в цепях электромагнитного корректора и в схеме токового компаундирования. Регулирование напряжения возбуждения турбогенератора осуществляется с помощью быстродействующего регулятора напряжения РНА-60, который подключается к вторичным выводам трансформаторов тока и напряжения, коммутируемым со стороны его шинных выводов обмотки статора.

Данный тезис об источнике искажений был подтвержден при проведении физических экспериментов по изменению режима работы генератора (изменению тока возбуждения машины), а также при его переводе на резервную систему возбуждения. Для подавления высших гармонических составляющих дана рекомендацию по установке дополнительных фильтров на шинах ГРУ 6 кВ.

Еще одним предметом исследований, выполненных в настоящей работе, являлось определение чувствительности и быстродействия систем регулирования частоты, напряжения и мощности турбоагрегата. Эти параметры систем автоматического управления определялись в результате анализа и цифровой обработки осциллограмм аварийных событий, зафиксированных в сентябре, октябре 2018 года мно-

гофункциональными электронными устройствами марки BINOM3. Далее выполнен анализ наиболее характерных нестационарных режимов работы системы электроснабжения энергокомплекса ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», обусловленных внешним междуфазным коротким замыканием (КЗ) или выделением ТЭЦ МЭИ на автономную (изолированную от центральной энергосистемы) работу.

На рис. 5 приведены цифровые осциллограммы фазных напряжений и токов турбогенератора в режиме междуфазного КЗ, зафиксированного 16 сентября 2018 года. Регистрация этого аварийного события была осуществлена в 20:02:14.257 обоими приборами BINOM3 по факту снижения (провала) напряжения с глубиной провала напряжения около 24,2 %. Спустя 130 мс внешнее КЗ было устранено при штатном (селективном) действии защит, что привело к сохранению устойчивой параллельной работы турбогенератора с центральной энергосистемой. Этот нестационарный режим характеризуется затухающими (декремент затухания $\alpha = -0{,}68$ с$^{-1}$) электромеханическими колебаниями периодом 0,65...0,75 с.

Следует также отметить характерную особенность работы вышеописанной системы возбуждения с электромагнитным корректором (ЭМК), которая наиболее ярко проявляется в первоначальной стадии послеаварийного режима – сразу после отключения КЗ (рис. 5, интервал времени $t \in [14{,}4$ с; $14{,}65$ с]). В указанный период времени реакция от схемы токового компаундирования незначительна, а регулирование возбуждения осуществляется в основном за счет сигнала ЭМК. При этом имеет место запаздывание около 240–250 мс, обусловленное в целом постоянной времени электромашинного возбудителя.

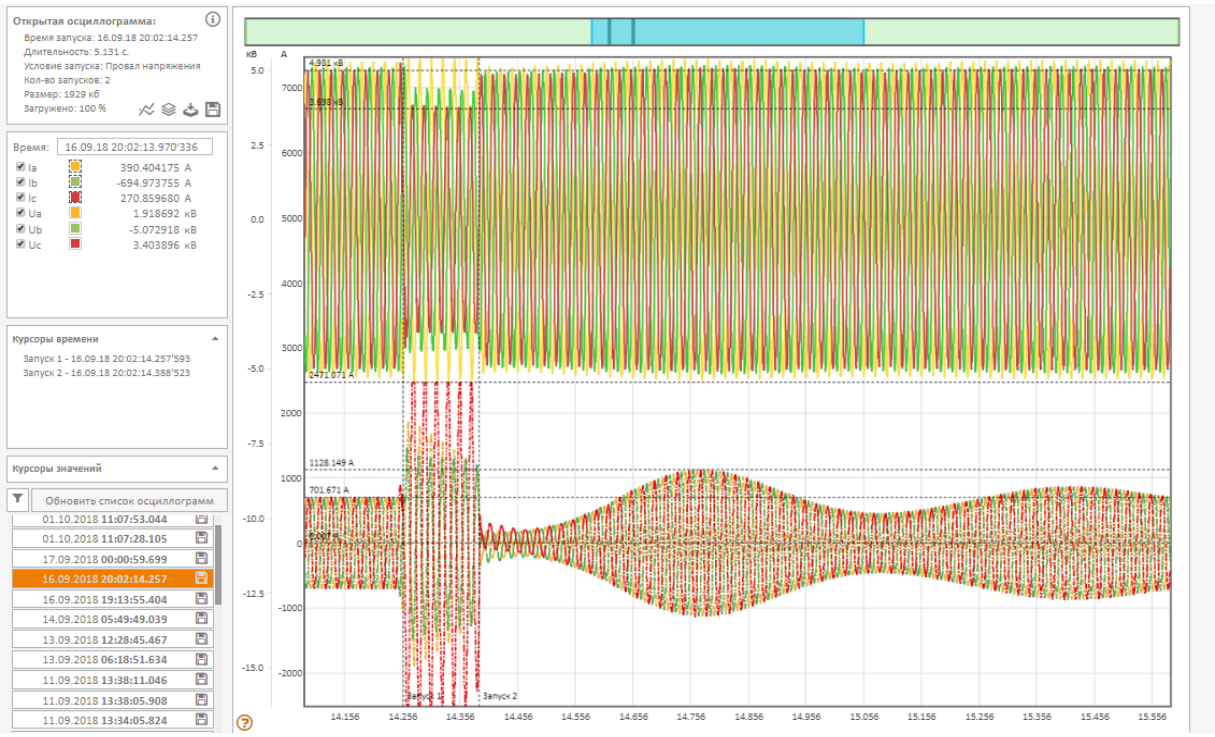


Рис. 5. Осциллограммы фазных токов и напряжений генератора в режиме внешнего двухфазного короткого замыкания.

Fig. 5. Oscillograms of phase currents and generator voltages in the mode of external two-phase short circuit.

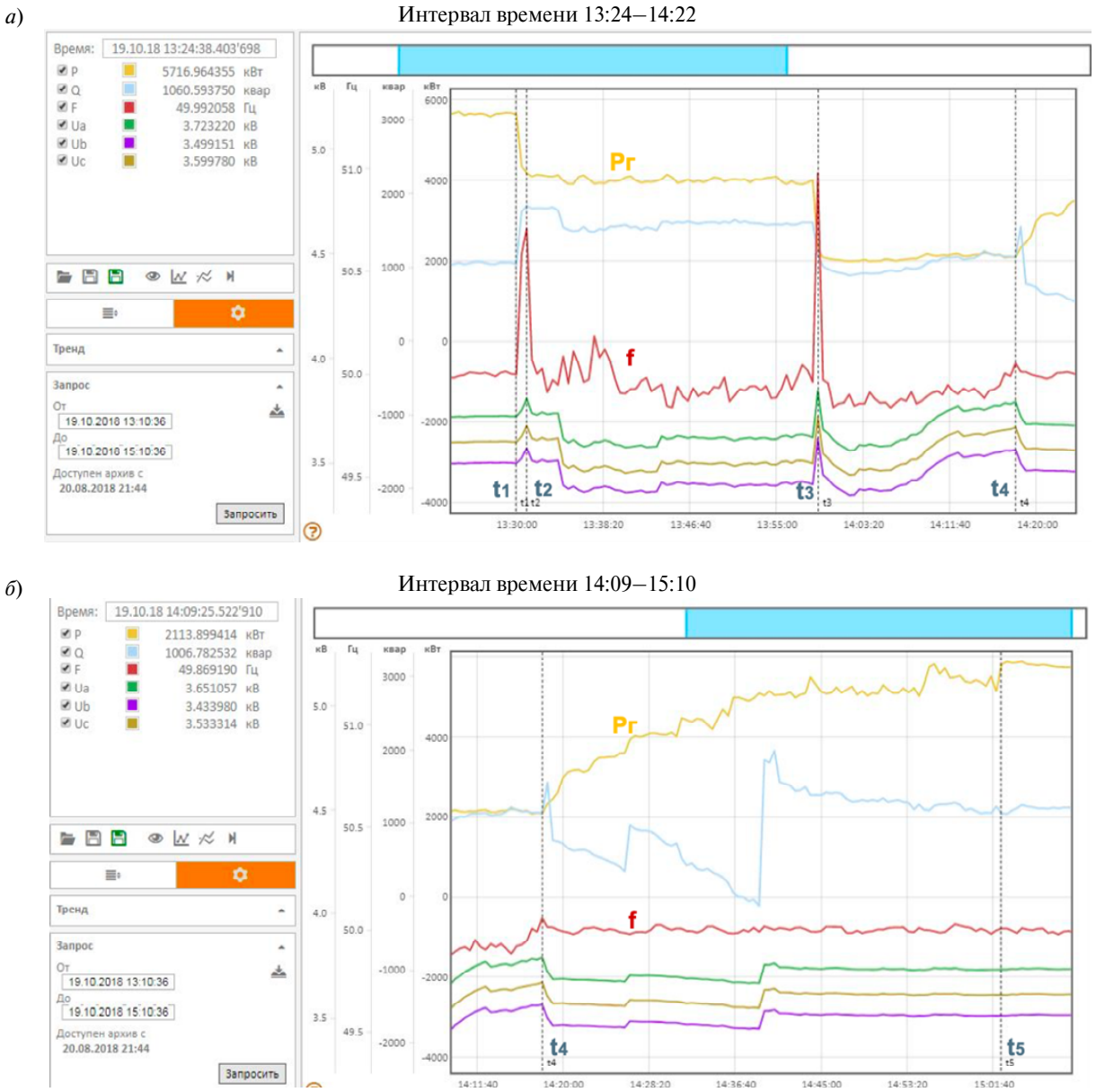


Рис. 6. Изменение активной мощности, частоты и среднеквадратичных значений фазных напряжений генератора при его выделении на изолированную работу (*а*) и последующей его ресинхронизации (*б*)

Fig. 6. Changes in the active power, frequency and RMS values of the phase voltages of the generator when it is isolated for isolated operation (*a*) and its subsequent resynchronization (*б*)

Оценка эффективности систем управления частотой и мощностью турбогенератора осуществляется в результате анализа нестационарных режимов его автономной и параллельной работы с энергосистемой. Для этого выполним краткое описание и анализ выделения ТЭЦ МЭИ на автономную работу, которое произошло 19 октября 2018 года. Характер изменения режимных параметров турбогенератора при выделении ТЭЦ МЭИ на изолированную от центральной энергосистемы работу и последующей с ней синхронизацией показаны на графиках рис. 6, *а*, *б*.

Из анализа графиков рис. 6, а следует, что до момента времени t_1 = 13:29 энергокомплекс ($S_Г$ = 5,64 + j 1,04 МВА) работает параллельно с энергосистемой с выдачей мощности по второй кабельной линии связи (ячейка № 12 в РП-10114 включена), действующие значения фазных напряжений (3,50–3,72 кВ) находятся в допустимых пределах.

В момент времени t_1 = 13:29 происходит отключение второй кабельной линии связи со стороны энергосистемы, что приводит к увеличению частоты до значения 50,7 Гц (рис. 6, *а*). Далее в течение одной минуты (t Є [13:29; 13:30]) происходит разгрузка турбоагрегата в результате действия АРЧМ, характеризующаяся снижением нагрузки агрегата до уровня 4 МВт (потребление с шин РП-10114, а также в системе собственных нужд).

Далее, по факту выданного диспетчером разрешения (t_3 = 13:58) была собрана схема синхронизации с отключением секционного выключателя в РП-10114, а также выключателя ТС 1 (ячейка 26, рис. 1) и, как следствие этого, отключением половины потребителей «НИУ «МЭИ» и дальнейшей разгрузкой агрегата до 2,1 МВт на время оперативных переключений. При этом было выявлено повышение частоты до уровня 51,28 Гц (рис. 6, *а*, момент времени t_3 = 13:58).

В период времени 13:58–14:17 было произведено включение выключателя ячейки № 12 в РП-10114 с последующим восстановлением питания потребителей, что в конечном итоге привело к разделению системы электроснабжения энергокомплекса «НИУ МЭИ» на две несинхронно работающие части. В момент времени t_4 = 14:17 на выключателе 6 кВ в цепи ТС2 произведена синхронизация ТЭЦ МЭИ с энергосистемой и восстановлена нормальная схема электроснабжения всех потребителей энергокомплекса.

Проводя анализ графиков изменения частоты и фазных напряжений в режиме изолированной работы ТЭЦ (рис. 6, *а*), следует отметить, что наибольшее значение отклонения частоты составило 1,28 Гц, с относительным временем превышения предельно допускаемого значения (0,4 Гц) около 0,1 %. В то же время отклонения фазных напряжений находились в нормативных пределах.

Здесь необходимо напомнить, что в соответствии с требованиями ГОСТ 32144 частота должна поддерживаться на уровне 50 ± 0,2 Гц в течение 95 % (относительно всей продолжительности) времени интервала наблюдений. Также на всем контролируемом интервале времени отклонения частоты относительно синхронной не должны превышать за диапазон ± 0,4 Гц. Однако, в автономных (изолированных) системах электроснабжения требования по предельно допустимому отклонению частоты менее жесткие, их величина не должна быть более ± 5 % (± 2,5 Гц).

С учетом этого замечания в результате анализа нестационарных режимов системы электроснабжения следует важный тезис (вывод) о полном соответствии по чувствительности и быстродействию систем регулирования частоты, мощности и возбуждения турбогенератора требованиям ГОСТ 32144, регламентирующем нормативные показатели (критерии) качества электроэнергии.

Наличие архивов* цифровой и статистической обработки, а также всех показателей качества электрической энергии в многофункциональных электронных устройствах марки BINOM3 позволили провести анализ и установить причины нарушений ПКЭ. В дополнение к функциям учета, контроля качества электрической энергии, осциллографирования наличие функций телесигнализации и

* Online доступ (логин: User, пароль: 1) для чтения архивной информации осуществляется по гиперссылкам:

• http://hpc-ec1.mpei.ru/index.html (BINOM337 на стороне 0,4 кВ ТСН);

• http://hpc-ec2.mpei.ru/index.html (BINOM337 на шинных выводах Г1).

телеуправления в приборах BINOM3 позволяют использовать их при построении электрических сетей в рамках «Цифровой трансформации энергетики».

Выводы

1. Исследования показателей качества электрической энергии на ТЭЦ МЭИ выявили отклонения по 35-й гармонической составляющей напряжения. В результате физических экспериментов и цифровой обработки электрических сигналов установлено, что источниками искажений, вносимых во внешнюю электрическую сеть являются выпрямительные блоки, коммутируемые в схеме управления возбуждением турбогенератора. Для подавления высших гармонических составляющих сформулирована рекомендация по установке дополнительных фильтров.

2. На основе исследования и анализа электромагнитных и электромеханических переходных процессов на ТЭЦ МЭИ произведена оценка показателей качества электроэнергии в нестационарных режимах работы энергокомплекса. Установлено, что по чувствительности и быстродействию системы регулирования частоты, мощности и возбуждения турбогенератора полностью соответствуют требованиям ГОСТ 32144.

3. Опыт промышленной эксплуатации приборов BINOM3 показал высокую степень их готовности к внедрению в «умных» электрических сетях с поддержкой функций оцифровки и хранения больших объемов данных, оперативного анализа, адаптивного анализа с применением технологий «искусственного интеллекта», а также функций мониторинга и контроля с использованием мобильных технологий передачи данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Васильева О.А.** Новый стандарт функциональности в промышленной автоматизации: интеллектуальные приборы BINOM3 // Автоматизация и IT в энергетике. 2015. № 12 (77). С. 27–34.

[2] **Васильева О.А.** Применение интеллектуальных счетчиков «BINOM3» для контроля и управления качеством электрической энергии // Управление качеством электроэнергии: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 26–28 ноября 2014 г.). М.: Центр полиграф. услуг «Радуга», 2014. С. 69–78.

[3] **Большаков О.В., Васильева О.А.** О происхождении и измерении гармонических искажений в электрических сетях // Управление качеством электрической энергии: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 23–25 ноября 2016 г.). М.: Центр полиграф. услуг «Радуга», 2017. С. 57–74.

[4] **Васильева О.А., Шахова М.А.** Качество электрической энергии в системах электроснабжения с выпрямительной преобразовательной нагрузкой // Автоматизация и IT в энергетике. 2018. № 11 (112). С. 34–41.

[5] **Vanin V., Bulychov A., Popov M., Vasilyeva O., Shakhova M.** Measurement of currents and voltages non-sinusoidal parameters in power supply systems with rectifier load // MATEC Web of Conference 245, 06007 (2018). EECE-2018

[6] **Vanin V., Bulychov A., Popov M., Vasilyeva O., Shakhova M.** About influence of non-sinusoidal currents and voltages on the amount of the electric energy // MATEC Web of Conference 245, 06009 (2018). EECE-2018.

[7] **Васильева О.А., Асаинов Д.Н.** Исследование качества электроэнергии и электромагнитных переходных процессов на ТЭЦ МЭИ с помощью многофункциональных счетчиков измерителей BINOM3 // Управление качеством электроэнергии: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, декабрь 2018 г.). М.: Центр полиграф. услуг «Радуга», 2019.

[8] Wide Area Protection & Control Technologies CIGRE, Working Group B5.14 Paris, 2016.

[9] **Mokeev A.** Digital Substation. URL: http://digitalsubstation.com

[10] **Mokeev A.** Proceedings IEEE International Conference SIBCON, 2017.

[11] **Mokeev A., Bovykin V., Miklashevich A., Ulyanov D.** Proceedings International Conference Actual Trends in Development of Power System Relay Protection and Automation, 2015.

[12] **Ilyshin P., Chusovitin P.** Relay Protection and Automation. 2014. 4. P. 16–22.

[13] **Kezunovic M., Meliopoulos S., Venkatasubramanian V., Vittal V.** Application of Time-Synchronized Measurements in Power System Transmission Networks. Springer, N. Y., 2014

[14] **Mokeev A.V., Bovykin V.N., Khromtsov E.I., Miklashevich A.V., Orlov F.Y., Ulyanov D.N.** Intelligent Electronic Devices for Digital Substations 110(35)/6 KV // 5th International Scientific and Technical Conference Actual Trends in Development of Power System Relay Protection and Automation Sochi, 2015.

[15] **Mokeev A.V., Bovykin V.N.** Intelligent devices for digital substations (2015) The New in Russian Electric Power Industry, (4), pp. 40–48.

[16]**Mokeev A.V., Perelygin L.N., Khromtsov E.I.** Combined 6-35 kV current and voltage transducers // The New in Russian Electric Power Industry. 2017. 1. P. 39–52.

[17]**Soldatov A.V., Antonov V.I., Naumov V.A., Ivanov N.G., Aleksandrova M.I.** Information base of protection for a generator from single-phase earth faults of the stator with monitoring of the higher harmonics of the differential current // Rel. Zashch. Avtomat, 2016. 3 (24). P. 12–20.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПОПОВ Максим Георгиевич – *доктор технических наук заведующий кафедрой «Электрические станции и автоматизация энергосистем» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*

E-mail: PopovMG@eef.spbstu.ru

ВАСИЛЬЕВА Ольга Алексеевна – *кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*

E-mail: vasilieva_oa@spbstu.ru

АСАИНОВ Данил Нуритдинович – *кандидат технических наук доцент Национального исследовательского университета «МЭИ»*

E-mail: AsainovDN@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 08.07.2019

REFERENCES

[1] **O.A. Vasilyeva,** Novyy standart funktsionalnosti v promyshlennoy avtomatizatsii: intellektualnyye pribory BINOM3, Avtomatizatsiya i IT v energetike. 2015. № 12 (77). C. 27–34.

[2] **O.A. Vasilyeva,** Primeneniye intellektualnykh schetchikov «BINOM3» dlya kontrolya i upravleniya kachestvom elektricheskoy energii, Upravleniye kachestvom elektroenergii: sb. tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Moskva, 26–28 noyabrya 2014 g.). M.: Tsentr poligraf. uslug «Raduga», (2014) 69–78.

[3] **O.V. Bolshakov, O.A. Vasilyeva,** O proiskhozhdenii i izmerenii garmonicheskikh iskazheniy v elektricheskikh setyakh, Upravleniye kachestvom elektricheskoy energii: sb. tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Moskva, 23–25 noyabrya 2016 g.). M.: Tsentr poligraf. uslug «Raduga», (2017) 57–74.

[4] **O.A. Vasilyeva, M.A. Shakhova,** Kachestvo elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya s vypryamitelnoy preobrazovatelnoy nagruzkoy, Avtomatizatsiya i IT v energetike, 11 (112) (2018) 34–41.

[5] **V. Vanin, A. Bulychov, M. Popov, O. Vasilyeva, M. Shakhova,** Measurement of currents and voltages non-sinusoidal parameters in power supply systems with rectifier load, MATEC Web of Conference 245, 06007 (2018). EECE-2018.

[6] **V. Vanin, A. Bulychov, M. Popov, O. Vasilyeva, M. Shakhova,** About influence of non-sinusoidal currents and voltages on the amount of the electric energy, MATEC Web of Conference 245, 06009 (2018). EECE-2018.

[7] **O.A. Vasilyeva, D.N. Asainov,** Issledovaniye kachestva elektroenergii i elektromagnitnykh perekhodnykh protsessov na TETs MEI s pomoshchyu mnogofunktsionalnykh schetchikov izmeriteley BINOM3, Upravleniye kachestvom elektroenergii: sb. tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Moskva, dekabr 2018 g.). M.: Tsentr poligraf. uslug «Raduga», 2019.

[8] (2016) Wide Area Protection & Control Technologies CIGRE, Working Group B5.14 Paris

[9] **A. Mokeev,** Digital Substation. URL: http://digitalsubstation.com

[10] **A. Mokeev,** Proceedings IEEE International Conference SIBCON, 2017.

[11] **A. Mokeev,, V. Bovykin, A. Miklashevich, D. Ulyanov,** Proceedings International Conference Actual Trends in Development of Power System Relay Protection and Automation, 2015

[12] **P. Ilyshin, P. Chusovitin,** Relay Protection and Automation, 4 (2014) 16–22

[13] **M. Kezunovic, S. Meliopoulos, V. Venkatasubramanian, V. Vittal,** Application of Time-Synchronized Measurements in Power System Transmission Networks. Springer, N. Y., 2014.

[14] **A.V. Mokeev, V.N. Bovykin, E.I. Khromtsov, A.V. Miklashevich, F.Y. Orlov, D.N. Ulyanov,** Intelligent Electronic Devices for Digital Substations 110(35)/6 KV, 5th International Scientific and Technical Conference Actual Trends in Development of Power System Relay Protection and Automation Sochi, 2015.

[15] **A.V. Mokeev, V.N. Bovykin,** Intelligent devices for digital substations, The New in Russian Electric Power Industry, 4 (2015) 40–48.

[16] **A.V. Mokeev, L.N. Perelygin, E.I. Khromtsov,** Combined 6-35 kV current and voltage transducers, The New in Russian Electric Power Industry, 1 (2017) 39–52.

[17] **A.V. Soldatov, V.I. Antonov, V.A. Naumov, N.G. Ivanov, M.I. Aleksandrova,** Information base of protection for a generator from single-phase earth faults of the stator with monitoring of the higher harmonics of the differential current, Rel. Zashch. Avtomat, 3 (24) (2016) 12–20.

THE AUTHORS

POPOV Maksim G. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*
E-mail: PopovMG@eef.spbstu.ru
VASILYEVA Olga A. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*
E-mail: vasilieva_oa@spbstu.ru
ASAINOV Daniil N. – *National research university «Moscow power engineering institute»*
E-mail: AsainovDN@gmail.com

Received: 08.07.2019

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019

DOI: 10.18721/JEST.25304
УДК 620.92

А.А. Калютик, Д.А. Трещев, Д.Л. Поздеева

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

УТИЛИЗАЦИЯ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ НА ТЭЦ г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Рассмотрена актуальная проблема обращения с твердыми бытовыми отходами. Показана возможность участия электростанций в получении тепловой и электрической энергии путем утилизации твердых бытовых отходов на действующих ТЭЦ г. Санкт-Петербурга. В качестве решения показано использование технологии газификации твердых бытовых отходов с получением в процессе газификации синтез-газа и его дальнейшим использованием в качестве топлива в паросиловом цикле. Для оценки технических показателей теплофикационных установок было выполнено моделирование и расчет тепловых схем в программе Boiler Designer. Показана возможность применения оборудования как с давлением свежего пара 100 кгс/см^2 (10 МПа), температурой 525 °С так и с давлением 140 кгс/см2 (14 МПа), температура 540 °С. Показано, что при работе станции в теплофикационном режиме данные варианты могут считаться равноценными, более высокие параметры пара эффективно применять на горизонте в 15 лет при разнице в цене оборудования до 139,54 млн рублей. Представлены требования к площадке действующей ТЭЦ для размещения нового энергоисточника. Критериям удовлетворяют Северная и Южная ТЭЦ г. Санкт-Петербурга.

Ключевые слова: альтернативное топливо, ТЭЦ, выработка тепловой и электрической энергии, твердые бытовые отходы, газификация.

Ссылка при цитировании:
Калютик А.А., Трещев Д.А., Поздеева Д.Л. Утилизация твердых бытовых отходов на ТЭЦ г. Санкт-Петербурга // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 3. С. 59–70. DOI: 10.18721/JEST.25304

A.A. Kalyutik, D.A. Treshchev, D.L. Pozdeeva

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

RECYCLING MUNICIPAL SOLID WASTE AT POWER-AND-HEATING PLANTS OF ST. PETERSBURG

The article reviews the essential problem of municipal solid waste (MSW) management. We consider the possibility of involving combined heat and power plants in energy recovery from MSW using the example of an operational cogeneration plant in St. Petersburg. We suggest using the gasification technology on hard household waste, which results in production of synthesis gas that can be used as a fuel in the steam cycle. To assess technical performance of the heating units, we carried out a simulation of the cycle arrangement and subsequent heat-and-mass balance calculation by means of Boiler Designer software. The equipment can run either at the pressure of 10 MPa and the temperature of 525 °C or at the pressure of 14 MPa and the temperature of 540 °C. The results of analysis show that the options are equivalent when the plant is operating in the heat-extraction mode, but it is more efficient to use the steam of higher service conditions in the 15-year period, until the price difference of the equipment is lower or equals 139.54 million rubles. There is a list of requirements imposed on an industrial site of the operational power plant for installing new energy sources. The Severnaya and the Yujnaya cogeneration plants meet the acceptance criteria.

Keywords: alternate fuel, power-and-heating plant, production heat and electricity energy, municipal solid waste, gasification.

Citation:
A.A. Kalyutik, D.A. Treshchev, D.L. Pozdeeva, Recycling municipal solid waste at power-and-heating plants of St. Petersburg, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 25 (03) (2019) 59–70. DOI: 10.18721/JEST.25304

Введение. Согласно Стратегии экологической безопасности РФ, на период до 2025 г., на территории нашей страны накоплено свыше 30 млрд т отходов. Кроме того, увеличивается количество отходов, которые не вовлекаются во вторичный хозяйственный оборот, а размещаются на полигонах и свалках, что ведет к выводу продуктивных сельскохозяйственных территорий из оборота. Около 15 тысяч санкционированных объектов размещения отходов расположены на территории общей площадью примерно 4 млн га. Эта территория каждый год увеличивается на 300–400 тыс. га. По данным Федеральной службы государственной статистики, в 2005 г. в Российской Федерации зафиксировано образование порядка 3 млрд т отходов, а в 2015 г. уже 5,06 млрд т (за 10 лет показатель вырос на 69 %)[1].

Средний объем утилизации отходов в Российской Федерации составляет лишь 35 %, что приводит не только к росту объемов накапливаемых и в дальнейшем захораниваемых отходов, но и к потере до 90 % полезной продукции, пользующейся спросом на рынке [1].

В настоящее время в результате деятельности населения, организаций и предприятий Санкт-Петербурга образуется 9,7 млн м^3 твердых бытовых отходов (ТБО) в год или 1,7 млн т. Лишь малая часть ТБО, образуемых в Санкт-Петербурге, перерабатывается на двух специализированных мусороперерабатывающих заводах (МПЗ), а основная часть ТБО размещается на полигонах без переработки[2].

Стратегические цели, поставленные Президентом и Правительством РФ в части обращения с отходами, направлены на построение новой системы обращения с отходами, и главным образом, с ТБО[3].

Цель работы – Показать возможность участия электростанций в формировании новой системы обращения с отходами, которая позволит вовлечь вторичные компоненты отходов в хозяйственный оборот, снижая воздействие полигонов ТБО на окружающую среду.

Производство альтернативного топлива

Одним из способов повышения экологической безопасности населения Санкт-Петербурга и снижение ущерба, причиняемого окружающей среде, может быть утилизация отходов путем производства вторичного топлива с целью получения тепловой и электрической энергии на действующих ТЭЦ города Санкт-Петербурга.

Вторичное топливо, получаемое из ТБО, получило название Refuse Derived Fuel (RDF) иначе топлива, полученного из отходов. Для производства RDF используются следующие фракции ТБО с относительно высокой теплотой сгорания: бумага, текстиль, древесина, пластмасса [2].

[1] Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года, утв. Распоряж. Правительства РФ № 84-р от 25.01.2018 г.

[2] Программа «Региональная целевая программа по обращению с твердыми бытовыми и промышленными отходами в Санкт-Петербурге на период 2012–2020 годов», утв. Постан. Правительства Санкт-Петербурга № 524 от 29.05.2012 г.

[3] Указ Президента РФ «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» № 204 от 07.05.2018 г.

Процесс производства альтернативного топлива (АТ) на базе ТБО включает в себя несколько стадий. Сепарация (сортировка) является первым и одним из самых главных этапов производства АТ. Ее задача распознать и удалить такие компоненты как камни, стекло, песок, керамика, а также извлечь элементы, которые при сжигании своими продуктами горения негативно влияют на окружающую среду. К таким элементам относятся изделия на основе поливинилхлорида (ПВХ), металлы, хлорсодержащие вещества, автомобильные запчасти и комплектующие, лампы, и т. д.

Следующий этап – измельчение (дробление) до необходимого размера фракции. Предварительное измельчение также может производиться и до сепарации. Это способствует упрощению дальнейшего технологического процесса и уменьшению размеров крупногабаритных отходов. Например, практикуется применение устройств по разрыванию пакетов.

Далее происходит сушка сырья, характеризующаяся большими потерями ТБО влаги. Тем самым сушка позволяет повысить теплотворные и энергетические показатели топлива, а также качество и калорийность топлива. Данный процесс, соответственно, повышает и стоимость, и востребованность АТ на рынке. Начальное содержание влаги в сырье обычно составляет 20–30 %, однако для топлива высокого качества влажность не должна превышать 9–11 %.

После сушки топливо уже может использоваться, но чаще завершающим этапом является изготовление топливных брикетов. Процесс брикетирования представляет собой прессование АТ под высоким давлением на механических прессах.

Калорийность топлива в большей степени зависит от содержания в отходах горючих фракций. Средние значения теплоты сгорания топлива RDF лежат в пределах от 12 до 18 МДж/кг. В целях исследования принят нижний порог теплоты сгорания RDF топлива 12 МДж/кг.

Примерный морфологический состав ТБО, образующихся в Санкт-Петербурге, приведен в табл. 1 [3–7].

Таблица 1

Морфологический состав твердых бытовых отходов в Санкт-Петербурге

Approximate morphological composition of solid municipal waste in St. Petersburg

Тип отходов	Относительная доля в общем составе, %
Органические отходы	27,4
ПЭ пленки	7,4
Бумага и картон	21,5
Другие пластики	2,5
Цветные металлы	3,8
Текстиль, кожа, резина	4,3
Черные металлы	0,8
Стекло	8,9
Дерево	2,5
ПВХ	0,1
ПЭТ	3,4
Инертные материалы	12,8
Пластик высокого давления	1,0
Прочие материалы	2,8
Итого	100,0

Исходя из морфологического состава твердых бытовых отходов можно определить процент извлечения АТ из ТБО, поступающих на сортировку. Он представляет собой сумму процентов материалов, входящих в состав АТ. В данном случае для Санкт-Петербурга процент извлечения составляет примерно 30 %.

Непосредственное сжигание АТ приводит к необходимости установки дорогостоящего газоочистного оборудования. Кроме того, калорийность АТ непостоянна, так как она зависит от состава отсортированных ТБО.

В качестве решения возможно использование наиболее перспективного метода термической утилизации – газификации ТБО с получением в процессе газификации синтез-газа и его дальнейшим использованием в качестве топлива в паросиловом цикле. Использование данной технологии исключает прямое сжигание отходов, а калорийность синтез-газа при этом постоянна. При этом очистку синтез-газа производить значительно проще, чем при прямом сжигании ТБО [8–11].

Сжигание синтез-газа освоено также и отечественными производителями котельного оборудования для металлургических, химических и иных производств (Таганрогский котельный завод, Барнаульский котельный завод, Подольский котельный завод).

Согласно территориальной схеме обращения с отходами Санкт-Петербурга в системе обращения с ТБО ключевую роль играет транспортная логистика. Мощности по обработке, утилизации и размещению ТБО расположены на севере и юге Санкт Петербурга. Таким образом, ТБО обрабатываются, обезвреживаются и утилизируются и/или размещаются на том же берегу Невы, где они и образовались. Соответственно, Санкт-Петербург разделен на две зоны деятельности региональных операторов – северную и южную. Согласно данной схеме в 2015 г. в зоне действия регионального оператора № 1 (южный) образовалось 845 898,78 т ТБО, а в зоне действия оператора № 2 (северный) – 857 454,37 т[4].

Таким образом, в Санкт-Петербурге центры по переработки ТБО возможно разместить в северной и южной части города по половине объема от всех образующихся ТБО каждый. Приняв для расчетов объем образовавшихся ТБО за 2015 год, при доле в 30 % годовой выход АТ составит 253769,6 т/год в южной и 257236,3 т/год в северной части города при минимальной теплотворной способности 12 МДж/кг.

Данная технология газификации применяется в городе Лахти (Финляндия). Местная ТЭЦ является самой большой в мире станцией с газификацией отходов. Ее производительность составляет 50 МВт в электроэнергии и 90 МВт в тепле. На станции сжигается 250 тыс. т/год отсортированных ТБО. Благодаря внедрению данной технологии закрыты несколько местных свалок, выбросы углекислого газа сократились на 30 %, согласно данным компании Valmet – производителя оборудования для получения синтез-газа из ТБО.

Принципиальная схема газификации ТБО на ТЭЦ в городе Лахти представлена на рис. 1.

Станция состоит из линии топливоподачи *1*, отделения газификатора *2* и фильтров *3*, отделения парового котла *4* и соответствующей газоочистки *5*.

Топливо подается на площадку ТЭЦ по линии топливоподачи с узла подготовки топлива или с приемного устройства, куда подготовленное топливо доставляется автотранспортом.

Процесс получения синтез-газа из отсортированных ТБО происходит в газификаторе с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС), куда поступает АТ. Газификатор включает в себя реактор, циклон, охладитель синтез-газа [12].

В псевдосжиженный слой, состоящий из топливной золы и известняка с песком подается воздух. Топливо частично окисляется воздухом, выделяя тепло, необходимое для газификации, без непосредственного горения. Процесс газификации происходит при температуре 800–850 °С.

Для разогрева реактора до 400 °С и поддержания процесса газификации, а также в случае ухудшения качества твердого топлива используется газовая горелка, которой оснащён газификатор.

[4] Постановление правительства Санкт-Петербурга от 16 декабря 2016 № 1147 о территориальной схеме обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными.

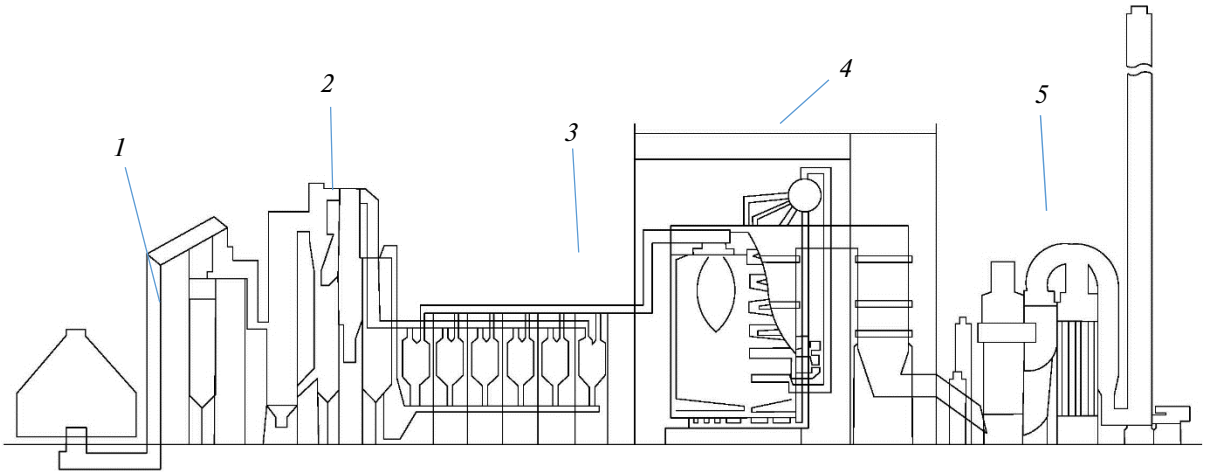


Рис. 1. Принципиальная схема газификации

1 – топливоподача; *2* – отделение газификатора; *3* – фильтры; *4* – паровой котел; *5* – газоочистка

Fig. 1. Basic scheme of gasification

Большая часть твёрдой фракции золошлаков низких классов опасности отделяется от газа в циклоне газификатора. Далее газ направляется из циклона в газоохладитель, а твердые частицы возвращаются на дно реактора.

Шлак в нижней части реактора удаляется зольными шнеками с водяным охлаждением и подаётся в съемные емкости, которые могут транспортироваться к месту складирования золошлаков. При этом часть шлака из подовой части реактора просеивается и подается обратно в газификатор.

В газоохладителе синтез-газ охлаждается. Снижение температуры синтез-газа необходимо для технологических целей и для предотвращения крайне нежелательного образования диоксидов и оксидов NO_x. Во время этого процесса происходит отдача теплоты газа на подогрев питательной воды.

Из газоохладителя синтез-газ поступает в газовые фильтры, где происходит удаление твердых частиц (включая отвердевшие коррозионные компоненты и летучую золу газификатора).

Очищенный синтез-газ поступает в паровой энергетический котел, где сжигается в качестве энергетического топлива. Отходящие газы от котла проходят многоступенчатую очистку и удаляются в дымовую трубу [13, 14].

Возможная тепловая схема приведена на рис. 2.

Данная схема отличается от традиционной паросиловой принципиальной тепловой схемы с теплофикационной турбиной *2* тем, что часть ПВД турбины заменена на водо-водяной теплообменник. Деаэрированная питательная вода из деаэратора *6* питательными насосами через водо-водяной охладитель синтез-газа *7* подаётся в паровой энергетический котел *1*.

Прокачка воды высокого давления через газоохладитель и водо-водяной теплообменник подогрева питательной воды осуществляется высокотемпературными насосами контура охлаждения газа.

Свежий пар на турбину поступает от парового энергетического котла, функционирующего на синтез-газе. Исходя из годового объема RDF топлива, получаемого из мусора южной части города, можно рассчитать часовой расход топлива, поступающего в газификатор, и паропроизводительность котла.

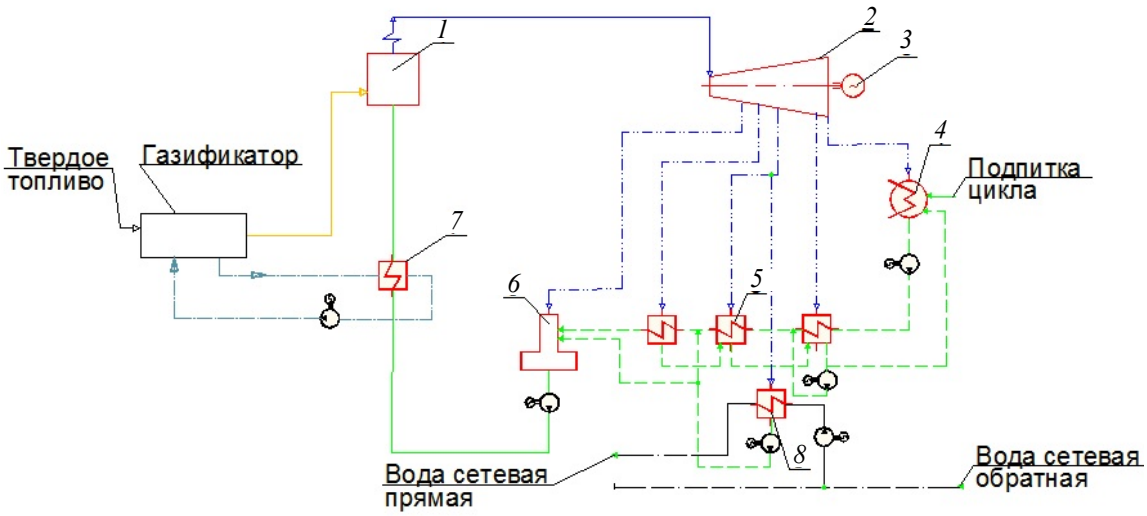


Рис. 2. Принципиальная тепловая схема ТЭЦ

1 – паровой котел; работающий на синтез-газе; *2* – теплофикационная турбина; *3* – электрогенератор; *4* – конденсатор; *5* – подогреватели низкого давления (ПНД); *6* – деаэратор; *7* – водо-водяной охладитель синтез-газа; *8* – сетевой подогреватель

Fig. 2. Power-and-heating plant's basic scheme

Расчетное исследование энергоисточника, функционирующего на альтернативном топливе

Средняя продолжительность ремонта котлоагрегата согласно нормативам[5] составляет 22 дня. Тогда годовой фонд рабочего времени ТЭЦ с учетом остановов на ремонт составит 8232 ч/год. Таким образом, расход RDF топлива с теплотворной способностью $Q_н^р$ = 12 МДж/кг составит: G_{rdf} = 8,68 кг/с.

КПД газификатора, согласно данным Valmet, составляет 87,5 % [12], а средний КПД современных паровых котлов, работающих на синтез-газе, согласно данным отечественных производителей, составляет 93 % [15]. Таким образом, тепловая мощность парового котла составит:

$$Q = \eta_г \cdot \eta_к \cdot Q_н^р \cdot G_{rdf} =$$
$$= 0,875 \cdot 0,93 \cdot 12 \cdot 8,68 = 84,76 \text{ МВт}.$$

Для выработки электрической и тепловой энергии в паровой турбине с целью унификации возможно применение стандартных сопряженных параметров пара на выходе с котла в Российской Федерации, а именно давление 100 кгс/см^2 (10 МПа), температура 525 °С и давление 140 кгс/см^2 (14 МПа), температура 540 °С. Применение пара 240 кгс/см^2 (24 МПа) нецелесообразно ввиду малой тепловой мощности котла и, как следствие, малых объемных расходов пара через паровую турбину.

Для оценки технических показателей теплофикационных установок с данными параметрами было выполнено моделирование и расчет тепловых схем в лицензированной программе Boiler Designer, разработанной фирмой OPTSIM-K. На рис. 3 и 4 представлены соответствующие расчетные модели, состоящие из газификатора, парового котла, турбины и вспомогательного оборудования.

Часть ПВД турбины представляет из себя водо-водяной теплообменник, греющей средой для которого является охлаждающая вода на выходе из газификатора. Температура питательной воды после ПВД на входе в котел принята 206,5 °С. Температуры прямой и обратной сетевой воды приняты соответственно 105 и 65 °С, при этом расход сетевой воды составил 1350 т/ч.

[5] СТО 70238424.27.100.017–2009 «Тепловые электростанции. Ремонт и техническое обслуживание оборудования, зданий и сооружений. Организация производственных процессов. Нормы и требования».

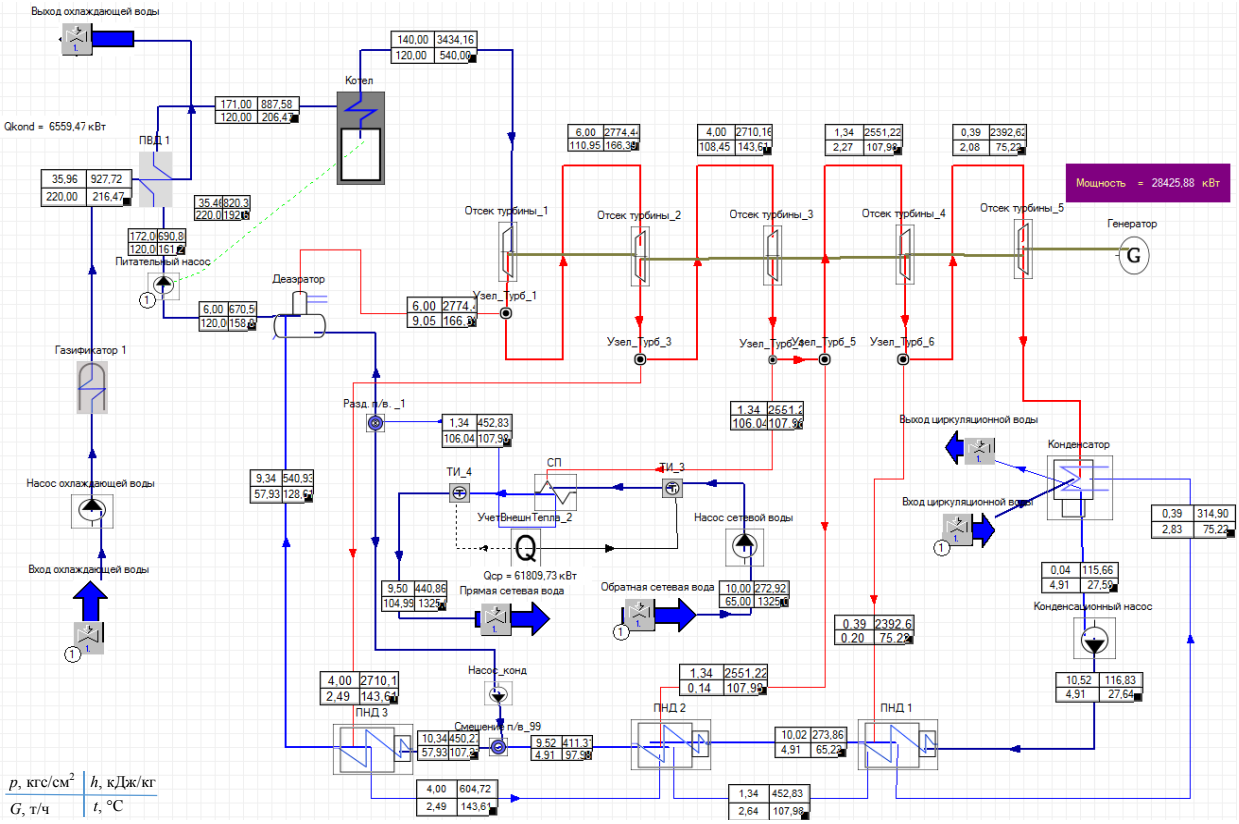


Рис. 3. Теплофикационная установка в программе Boiler Designer с давлением 140 кгс/см² (14 МПа) и температурой 540 °С пара на выходе с котла.

Fig. 3. Combined heat and power plant created in Boiler Designer at the pressure of 14 MPa and the temperature of 540 °C

На основании тепловой мощности котла для двух вариантов была рассчитана его паропроизводительность:

$$G_{p=140\ \text{кгс/см}^2} = \frac{Q}{(h_{\text{п}} - h_{\text{пв}})} = \frac{84{,}76 \cdot 10^3}{(3434{,}16 - 887{,}58)} = 33{,}28\ \text{кг/с};$$

$$G_{p=100\ \text{кгс/см}^2} = \frac{Q}{(h_{п} - h_{пв})} = \frac{84{,}76 \cdot 10^3}{(3439{,}04 - 885{,}93)} = 33{,}2\ \text{кг/с}.$$

Таким образом, для двух режимов паропроизводительность приблизительно составила 120 т/ч. Электрическая мощность, генерируемая в паротурбинной установке с начальным давлением 140 кг/см² (14 МПа) составила 28,43 МВт (см. рис. 3), в установке с начальным давлением 100 кг/см² (10 МПа) – 27,29 МВт (см. рис. 4). Тепловая мощность сетевой установки одинакова.

Основные технические показатели, полученные на основании расчетных моделей, сведены в табл. 2. Суммарные затраты электроэнергии на собственные нужды были приняты равными 25,5 % от общей годовой выработки электрической энергии. Расход тепла на собственные нужды в расчетах не учитывался. Удельный расход топлива на отпуск тепла принят постоянным и равным 155 кг/Гкал.

При работе станции в теплофикационном режиме оба варианта имеют схожие показатели энергетической эффективности и могут считаться равноценными ввиду несущественной разницы между ними. Таким образом, каждый из них является приемлемыми и окончательный выбор основного, и вспомогательного оборудования (котел, турбина, паропроводу, насосы и др.) должен производиться исходя из стоимости этого оборудования.

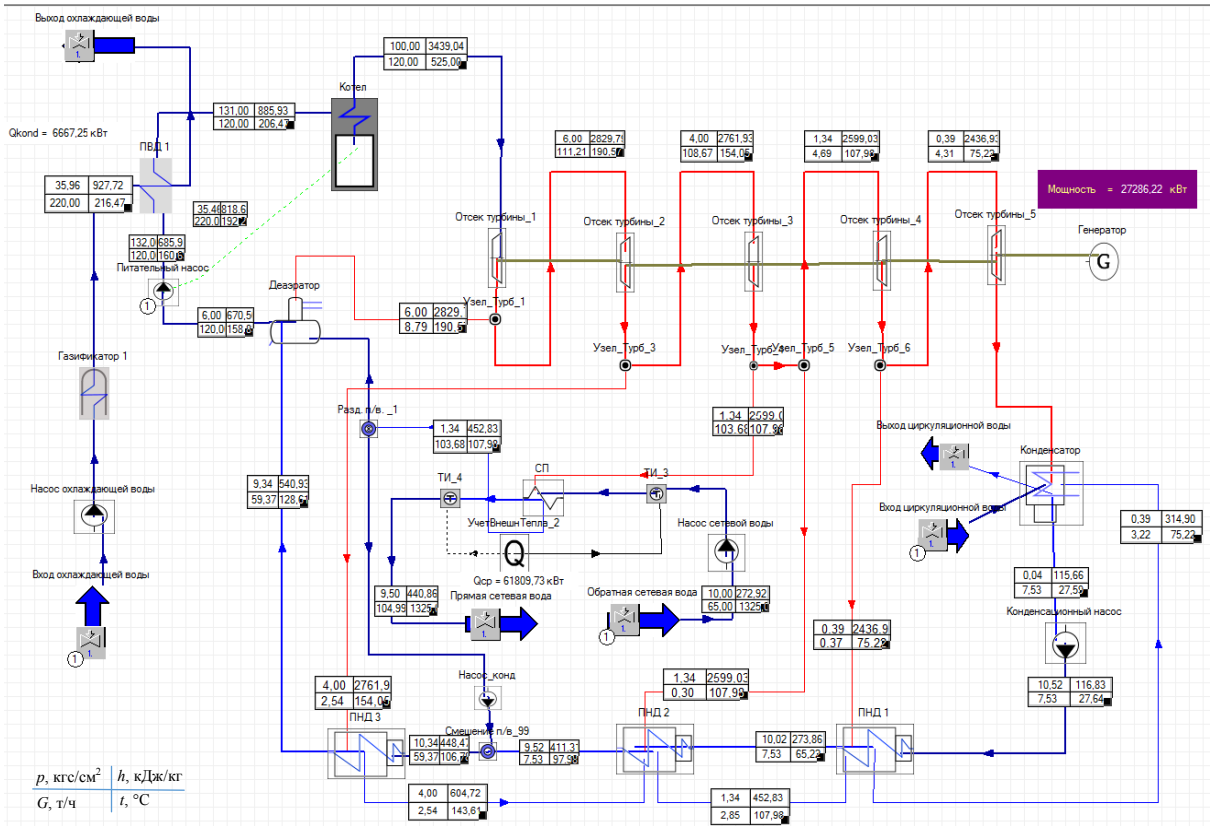


Рис. 4. Теплофикационная установка в программе Boiler Designer с давлением 100 кгс/см² (10 МПа) и температурой 525 °С пара на выходе с котла.

Fig. 4. Combined heat and power plant created in Boiler Designer at the pressure of 10 MPa and the temperature of 525 °C)

Таблица 2

Основные технические показатели расчетных моделей

Basic parameters of designed models

Показатель, ед. измерения	Обозначение	p = 140 кгс/см² t = 540 °С	p = 100 кгс/см² t = 525 °С
Выработка электроэнергии, МВт·ч	$N_{э_выр}$	238045,92	228664,80
Отпуск тепла потребителям, Гкал	$Q_{тэц}$	445087,53	445087,53
Суммарные затраты электроэнергии на собственные нужды, МВт·ч	$N_{э_сн}$	49660,20	47703,15
Отпуск электроэнергии, МВт·ч	$N_{э_отп}$	188385,72	180961,65
Суммарные затраты условного топлива, т.у.т.	$B_{топ}$	107091,71	107091,71
Расход условного топлива на отпуск электроэнергии, т.у.т.	$B_{э}$	38103,1	38103,1
Расход условного топлива на отпуск тепла, т.у.т.	$B_{тэ}$	68988,6	68988,6
Удельный расход топлива на отпуск э/энергии, г/кВт·ч	$b_{э_н}$	202,3	210,6
Удельный расход топлива на отпуск тепла, кг/Гкал:	$b_{тэ_н}$	155,0	155,0
КИТТ брутто	$\eta_{китт}$	0,81	0,80

Разница в отпускаемой электрической энергии за год в двух вариантах при равных суммарных затратах условного топлива составляет $\Delta N_{отп}$ = 7424 МВт·ч. Установленная мощность в варианте с давлением пара 140 кгс/см^2 (14 МПа) больше на $\Delta N_{уст}$ = 1,14 МВт, чем в варианте с давлением пара 100 кгс/см^2 (10 МПа).

При рыночной стоимости одного кВт·ч составляющей 1,234 руб. и цене КОМ за один МВт установленной мощности в 124 048 руб./мес. [16], более высокие параметры пара эффективно применять на горизонте в 15 лет при разнице в цене оборудования ⩽139,54 млн руб. или примерно 75 долл./кВт установленной мощности (без учета нормы дисконтирования).

Требования к площадке действующей ТЭЦ для размещения нового энергоисточника

Площадка действующей ТЭЦ, на территории которой планируется расположение нового энергоисточника, должна быть расположена в районе с удовлетворительной транспортной и логистической доступностью. ТЭЦ должна располагаться на существенном отдалении от зон жилой застройки, от существующих, а также перспективных селитебных территорий.

Площадка ТЭЦ должна удовлетворять законодательным требованиям по соблюдению нормативной санитарно-защитной зоны (СЗЗ) для мусороперерабатывающих и мусоросжирающих предприятий с производительностью выше 40 тыс. т ТБО в год – 1000 м[6].

ТЭЦ должна располагать свободными площадками требуемых размеров для размещения как нового источника генерации, так и зоны сортировки ТБО требуемой площади, ориентировочно составляющей 4 га.

Помимо перечисленных обстоятельств, площадка ТЭЦ должна быть обеспечена необходимыми водными ресурсами, иметь заезд авто- ж/д транспорта, быть приближена к линиям электропередач, иметь развитую инфраструктуру (в том числе социальную, транспортную, коммунальную).

В районе ТЭЦ должны иметься значительные присоединённые тепловые нагрузки. Это позволило бы новому энергоисточнику вписаться в тепловой баланс существующей станции, максимально задействовав при этом свои тепловые мощности. Во внимание должны быть приняты существующие и перспективные договорные присоединённые тепловые нагрузки ТЭЦ, в том числе среднечасовая ГВС. При интеграции новой ТЭЦ в схему ТФУ действующей станции, новая ТЭЦ должна получить приоритет в отпуске тепловой энергии внешним потребителям как в отопительный, так и в межотопительный сезон, учитывая фактор повышения температуры исходной воды до +15 °С и фактор снижения водопотребления в летний сезон. Минимальная нагрузка ГВС потребителей ТЭЦ должна позволить полностью обеспечить новую ТЭЦ круглогодичной тепловой нагрузкой в размере 100 % от её расчётной тепловой мощности.

Должна быть предусмотрена возможность отпуска тепловой энергии новой ТЭЦ через существующую схему выдачи тепловой мощности ТЭЦ, на территории которой планируется расположить новый энергоисточник, а также присоединения к подающему и обратному общестанционному коллектору сетевой воды действующей станции.

Включение нового энергоблока в работу не должно создавать трудностей для функционирования действующей ТЭЦ в части выдачи электрической энергии в энергосистему. Мощность, вырабатываемая в результате работы паросилового цикла, может выдаваться в сеть, а также расходоваться на собственные нужды. Кроме того, станция должна иметь удовлетворительный коэффициент использования установленной мощности (средний уровень по энергосистеме).

Данным критериям по г. Санкт-Петербургу удовлетворяют Северная, Южная и Северо-Западная ТЭЦ. Однако, согласно данным[7] на

[6] СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200–03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов».

[7] Утвержденная Приказом Минэнерго России № 622 от 31.07.2018 г. Схема теплоснабжения Санкт-Петербурга на период до 2033 года.

2019 год среднечасовая нагрузка ГВС Северо-Западной ТЭЦ составляет лишь 0,5 Гкал/ч, что не позволит обеспечить новую ТЭЦ круглогодичной тепловой нагрузкой.

Выводы

В работе можно сделать следующие основные выводы:

1. Существует принципиальная возможность использования ТБО в качестве топлива с целью получения тепловой и электрической энергии путем их утилизации на действующей ТЭЦ Санкт-Петербурга;

2. С учетом изложенных требований к действующей площадке ТЭЦ и планируемым размещением центров по переработки ТБО в Санкт-Петербурге в северной и южной части города по половине объема от всех образующихся ТБО каждый предлагается к использованию Северная ТЭЦ-21 и Южная ТЭЦ-22 соответственно;

3. В современных экономических условиях г. Санкт-Петербурга, для выработки электрической и тепловой энергии на предложенной установке более эффективно применение цикла со стандартным начальным давлением пара 140 кгс/см^2 (14 МПа) и температурой 540 °С (по сравнению со стандартным давлением 100 кгс/см^2 (10 МПа) и температурой 525 °С) при условии удорожания объекта не более чем на 75 долл./кВт установленной мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Кустова М.П.** Утилизация твердых бытовых отходов как экологическая проблема // Gaudeamus igitur. 2015. № 2. С. 54–57.

[2] **Бернадинер И.М., Александрова Е.Ю.** Использование отходов как альтернативного топлива в цементной печи // Твердые бытовые отходы. 2017. № 11. С. 22–25.

[3] **Ложечко В.П., Крицын М.С.** О методах получения альтернативного топлива из твердых бытовых отходов // Современное машиностроение. Наука и образование. 2013. № 3. С. 982–991.

[4] **Бушихин В.В., Кайгородов О.Н., Полозов Г.М., Федосеев О.Е.** Альтернативные топлива из твердых отходов. Применение и легализация // Экологический вестник России. 2013. № 5. С. 42–45.

[5] **Ламзина И.В., Голдов А.В., Князев Я.И., Полозова И.А., Желтобрюхов В.Ф.** Получение и использование альтернативного топлива из твердых бытовых отходов для цементной промышленности // Инженерный вестник Дона. 2014. № 2. С. 18.

[6] **Степанчикова И.Г., Деревянко А.В., Зайцев В.А.** Вторичное топливо из отдельных компонентов бытовых отходов // Энергия: экономика, техника, экология. 2014. № 2. С. 40–45.

[7] **Бушихин В.В., Колтон Г.П., Ломтев А.Ю.** RDF из ТКО // Твердые бытовые отходы. 2017. № 11. С. 22–25.

[8] **Шабуров Е.Л., Федюхин А.В., Ипполитов В.А.** Расчет режимных параметров установки газификации ТБО // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. № 3. С. 38–44. DOI: 10.18721/JEST.240303

[9] **Загрутдинов Р.Ш., Негуторов В.Н., Малыхин Д.Г., Сеначин П.К., Никишанин М.С., Филипченко С.А.** Подготовка и газификация твердых бытовых отходов в двухзонных газогенераторах прямого процесса, работающих в составе мини-ТЭЦ и комплексов по производству синтетических жидких топлив // Ползуновский вестник. 2013. № 4/3. С. 47–62.

[10] **Бернадинер И.М., Бернадинер М.Н.** Высокотемпературная переработка отходов. Плазменные источники энергии // Твердые бытовые отходы. 2011. № 4. С. 16–19.

[11] **Владимиров Я.А., Зысин Л.В.** Методические вопросы энергетического использования твердых коммунальных бытовых отходов и продуктов их газификации // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 1. С. 5–16. DOI: 10.18721/JEST.240101

[12] Valmet: офиц. сайт. URL: https://www.valmet.com/

[13] Lennart Ljungblom. Biomass to energy XL // Bioenergy International. 2013. No. 63.

[14] **Бернадинер И.М., Ковальчук А.А.** Утилизация твердых бытовых отходов методом паровоз-

душной газификации // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2014. № 2. С. 81–97.

[15] ООО «Сибэнергомаш – БКЗ»: офиц. сайт. URL: http://www.sibem-bkz.com/ru

[16] Ассоциация «НП Совет рынка»: офиц. сайт. URL: https://www.np-sr.ru/ru

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КАЛЮТИК Александр Антонович – *кандидат технических наук директор высшей школы атомной и тепловой энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*
E-mail: kalyutik@yandex.ru

ТРЕЩЕВ Дмитрий Алексеевич – *старший преподаватель Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*
E-mail: dtreshchev@szvep.ru

ПОЗДЕЕВА Дарья Львовна – *студент 2 курса магистратуры Санкт-Петербургского политехнического университета*
E-mail: daripozdeeva@ya.ru

Статья поступила в редакцию: 16.09.2019

REFERENCES

[1] **M.P. Kustova,** Utilizatsiya tverdykh bytovykh otkhodov kak ekologicheskaya problema [Ecological problem of utilization of hard domestic wastes], Gaudeamus igitur. 2015. №2. S. 54–57.

[2] **M. Bernadiner, Ye.Yu. Aleksandrova,** Ispolzovaniye otkhodov kak alternativnogo topliva v tsementnoy pechi [Use of waste as an alternate fuel of cement kiln], Tverdyye bytovyye otkhody, 11 (2017) 22–25.

[3] **V.P. Lozhechko, M.S. Kritsyn,** O metodakh polucheniya alternativnogo topliva iz tverdykh bytovykh otkhodov [Methods of production of alternative fuel from solid waste], Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye, 3 (2013) 982–991.

[4] **V.V. Bushikhin, O.N. Kaygorodov, G.M. Polozov, O.Ye. Fedoseyev,** Alternativnyye topliva iz tverdykh otkhodov. Primeneniye i legalizatsiya [Alternative fuel from solid waste. The use and legalization], Ekologicheskiy vestnik Rossii, 5 (2013) 42–45.

[5] **I.V. Lamzina, A.V. Goldov, Ya.I. Knyazev, I.A. Polozova, V.F. Zheltobryukhov.** Polucheniye i ispolzovaniye alternativnogo topliva iz tverdykh bytovykh otkhodov dlya tsementnoy promyshlennosti [The receipt and use of alternative fuels from municipal solid waste for cement industry], Inzhenernyy vestnik Dona, 2 (2014) 18.

[6] **I.G. Stepanchikova, A.V. Derevyanko, V.A. Zaytsev,** Vtorichnoye toplivo iz otdelnykh komponentov bytovykh otkhodov [The secondary fuel from the individual components of household waste], Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya, 2 (2014) 40–45.

[7] **V.V. Bushikhin, G.P. Kolton, A.Yu. Lomtev,** RDF iz TKO [RFD from SMW], Tverdyye bytovyye otkhody, 11 (2017) 22–25.

[8] **A.A. Sarkisov, S.V. Antipov, V.P. Bilashenko, M.N. Kobrinsky,** Strategic planning and its application in solving complex engineering and technical problems, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 3 (2018) 38–44. DOI: 10.18721/JEST.240303

[9] **R.Sh. Zagrutdinov, V.N. Negutorov, D.G. Malykhin, P.K. Senachin, M.S. Nikishanin, S.A. Filipchenko,** Podgotovka i gazifikatsiya tverdykh bytovykh otkhodov v dvukhzonnykh gazogeneratorakh pryamogo protsessa, rabotayushchikh v sostave mini-TETs i kompleksov po proizvodstvu sinteticheskikh zhidkikh topliv [The preparation and gasification of solid waste in two-zone gas generators of the direct process, working with the CHP and complexes for the production of synthetic liquid fuels], Polzunovskiy vestnik, 4/3 (2013) 47–62.

[10] **M. Bernadiner, M.N. Bernadiner,** Vysokotemperaturnaya pererabotka otkhodov. Plazmennyye istochniki energii [High-temperature recycling. Plasma energy sources], Tverdyye bytovyye otkhody, 4 (2011) 16–19.

[11] **Ya.A. Vladimirov, L.V. Zyssin,** Methodological aspects of energy utilization of municipal solid waste and

its gasification products, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 24 (1) (2018) 5–16. DOI: 10.18721/JEST.240101

[12] Valmet: ofits. sayt. URL: https://www.valmet.com/

[13] Lennart Ljungblom. Biomass to energy XL, Bioenergy International, 63 (2013).

[14] **I.M. Bernadiner, A.A. Kovalchuk,** Utilizatsiya tverdykh bytovykh otkhodov metodom parovozdushnoy gazifikatsii [Utilisation of solid municipal waste by air-vapor gasification method], Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatelskogo politekhnicheskogo universiteta, Prikladnaya ekologiya. Urbanistika, 2 (2014) 81–97.

[15] Sibenergomash – BKZ: ofits. sayt. URL: http://www.sibem-bkz.com/ru

[16] NP Sovet rynka: ofits. URL: https://www.np-sr.ru/ru

THE AUTHORS

KALYUTIK Alexandr A. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*
E-mail: kalyutik@yandex.ru
TRESHCHEV Dmitriy A. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*
E-mail: dtreshchev@szvep.ru
POZDEEVA Daria L. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*
E-mail: daripozdeeva@ya.ru
Received 16.09.2019 г.

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019

DOI: 10.18721/JEST.25305
УДК 533.6.011.72

М.В. Сильников

ЗАО «Научно-производственное объединение Специальных материалов»,
Санкт-Петербург, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

В статье представлены пути и методы использования газонаполненных релаксационных систем для обеспечения безопасного применения импульсных высокоэнергетических технологий. Рассмотрены акустические характеристики релаксационных систем, ожидаемые пределы изменения перепада давления при отражении ударных волн на жесткой стенке в двухфазных средах. Описаны реальные возможности регулирования параметров взрывных волн при детонации зарядов взрывчатых веществ в различных средах, динамическое поведение ударных волн в релаксационных системах. Показаны различные схемы и методы преобразования подводных взрывных нагрузок. Приведены примеры использования структурированных релаксационных систем для защиты от внешних, вибрационных и колебательных воздействий. Приведена актуальность описания закономерностей эволюции ударно-волновых процессов в газах, жидкостях и газожидкостных системах с единых позиций и выявление критериев подобия взаимодействия ударных волн с биологическими объектами и конструкциями.

Ключевые слова: релаксационные системы, обеспечение безопасности, импульсные высокоэнергетические технологии, ударные волны, ударно-волновые процессы, газожидкостные системы, двухфазные среды, детонация, взрывные волны, параметры, динамика.

Ссылка при цитировании:
Сильников М.В. Применение релаксационных систем для обеспечения безопасности // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 3. С. 71–85. DOI: 10.18721/JEST.25305

M.V. Silnikov

Special Materials Corp., St. Petersburg, Russia

APPLICATION OF RELAXATION SYSTEMS FOR SECURITY

The article presents ways and methods of using gas-filled relaxation systems to ensure safe use of pulsed high-energy technologies. The acoustic characteristics of relaxation systems, the expected limits of the pressure drop during the reflection of shock waves on a rigid wall in two-phase media are considered. The real possibilities of controlling the parameters of explosive waves during detonation of explosive charges in various media, the dynamic behavior of shock waves in relaxation systems are described. Various schemes and methods for converting underwater explosive loads are shown. Examples of using structured relaxation systems to protect against external, vibrational and vibrational influences are given. The relevance of describing the laws of evolution of shock-wave processes in gases, liquids and gas-liquid systems from a single perspective and identifying criteria for similarity of interaction of shock waves with biological objects and structures is given.

Keywords: relaxation systems, safety, pulsed high-energy technologies, shock waves, shock wave processes, gas-liquid systems, two-phase media, detonation, blast waves, parameters, dynamics.

Citation:
M.V. Silnikov, Application of relaxation systems for security, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 25 (03) (2019) 71–85. DOI: 10.18721/JEST.25305

Введение. Интенсивное развитие технологических процессов резки, сварки и обработки материалов взрывом существенно расширило область применения конденсированных взрывчатых веществ в промышленности. При этом значительно возрос объем технологических работ, которые приходится проводить не на специально оборудованных полигонах и во взрывных камерах, а в городских условиях и цеховых помещениях, в пожаро-взрывоопасной обстановке при ликвидации последствий аварий на нефтегазопроводном транспорте и в условиях радиационных загрязнений.

Семейство портативных переносных локализаторов взрыва типа «Фонтан» на основе релаксационных систем в эластичных оболочках (испытаны и серийно изготовлены в НПО Спецматериалов г. Санкт-Петербург) успешно применено для изоляции и последующей ликвидации взрывоопасных предметов в интересах МВД, МЧС и МО России.

Наличие в России организаций, имеющих опыт изготовления и использования удлиненных кумулятивных зарядов (УКЗ), в сочетании с простыми средствами локализации и опытом их применения, создает предпосылки быстрого внедрения, упрощения и удешевления ликвидационных и утилизационных мероприятий на отработавших положенный срок энергетических и транспортных объектах. Требует специального анализа вопрос о разумной комбинации экологически чистых импульсных технологий с традиционными способами на разных стадиях разделки и утилизации.

Центральной проблемой при решении задач импульсной разделки и разрезки демонтируемых конструкций является комплексное обеспечение экологической чистоты и пожаро-взрывобезопасности технологических процессов с использованием энергии взрыва в воздушной атмосфере или под водой. Основными из негативных побочных факторов, сопровождающих использование взрывных технологий, являются [1, 2]:

взрывные воздушные волны, опасные для обслуживающего персонала и конструктивных элементов оборудования, соседнего с местом проведения взрывных работ;

огненные шары от продуктов не полного взрывного превращения, способные стать очагами вторичного возгорания вблизи места взрыва;

пылеобразование и выбросы пыли от разрушаемых взрывом конструкций;

гидроударные волны, приводящие к поражению ихтиофауны при подводных взрывных работах и повреждению близлежащих конструкций;

вероятность возбуждения неконтролируемых процессов горения и детонации при ведении работ во взрывоопасной атмосфере.

Для ослабления и трансформации ударных волн до безопасного уровня по фугасным нагрузкам, подавления огненных шаров и пылевых выбросов во всех перечисленных случаях актуальной является проблема создания эффективных и простых в исполнении способов комплексной локализации действия взрыва. Подобные способы должны быть простыми в технической реализации, обладать мобильностью и не снижать эффективности самих технологических процессов резки, сварки и обработки взрывом. В частности, в технологиях с использованием УКЗ методы локализации не должны препятствовать образованию кумулятивных струй при резке взрывом.

Возникающие при этом проблемы носят междисциплинарный характер и лежат на стыке различных областей науки, прежде всего, физики взрыва, гидродинамики, сварки и родственных технологий. Комплексное изучение ударно-волновых процессов и обобщение полученных результатов потребовало развития методов аналогии и подобия, а также эффективных физических и математических моделей, которые выявляют общие закономерности и определяют безразмерные параметры, позволяющие целенаправленно управлять ударно-волновыми нагрузками при взрыве в релаксационных (газожидкостных) средах с различной структурой и термодинамическими свойствами.

В связи с использованием на практике широкого ассортимента релаксационных сред, актуальным оказалось описание закономерностей эволюции ударно-волновых процессов в газах, жидкостях и газожидкостных системах с единых позиций и выявление критериев подобия взаимодействия ударных волн с биологическими объектами и конструкциями. Такой синтез знаний об эволюции и динамике ударно-волновых процессов необходим и для решения обратных задач взрыво-технической экспертизы аварий и несанкционированных взрывов с целью определения (по данным поражения окружающих объектов) характеристик и энергии источников взрыва.

Акустические характеристики релаксационных систем

Рассмотрим вопрос о повышении сжимаемости сплошной жидкости (например, воды) за счет ее капсуляции в эластичной сжимаемой оболочке. Решение такой задачи известно, и в качестве примера возьмем систему вода + пузырьки воздуха в непроницаемой оболочке (для простоты в трубе) с податливыми стенками [3–8]. Скорость звука в такой системе можно определить по соотношению

$$C^2 = \left[\beta\rho_g + (1-\beta)\rho_f\right]^{-1}\left[\frac{\beta}{P_0} + \frac{1-\beta}{\rho_f C_f^2} + \frac{2\theta r}{Et}\right]^{-1}.$$

Здесь β – объемная доля пузырьков газа в жидкости; ρ_g – плотность газа; ρ_f – плотность жидкости; P_0 – давление; E – модуль упругости материала оболочки (стенки трубы); θ – коэффициент, характеризующий условия закрепления оболочки ($\theta = 1...0{,}5$ для трубы, закрепленной с одного конца и $\theta = 1 - \mu^2$ для трубы, защемленной с обоих концов); μ – коэффициент Пуассона); t – толщина стенки оболочки (трубы); r – радиус оболочки (трубы).

Параметрическая зависимость $C = f(\beta)$ представлена линией 1 на рис. 1 для практически интересной релаксационной системы жидкость + пузырьки воздуха при $P_0 = 0{,}1$ МПа и величине параметра $2\theta r/t = 10$. Линия 1 рассчитана для скорости звука в объеме несжимаемой жидкости ($C_f > \infty$), помещенной в несжимаемую оболочку ($E > \infty$). Линия 2 получена для воды ($C_f = 1450...1500$ м/с) при $E \to \infty$. Линия 3 получена для воды в стальной трубе при $E = 200$ ГПа. Линия 4 получена для воды в оболочке из эластичного материала с $E = 1$ ГПа. Как видно при $\beta \le 10^{-2}$ скорость звука D регулируется упругостью материала стенок оболочки. При объемной доле газовых включений в жидкости $\beta \ge 10^{-2}$ или точнее $\beta \ge \Delta P_1/\rho_f C_f^2$ сжимаемость конструкции (оболочка–жидкость–газовые поры) не зависит от свойств наполнителя и материала стенок оболочки. Здесь: $\Delta P_1 = P_1 - P_0$ – амплитуда возмущения давления при давлении за фронтом P_1. Как следует из графика на рис. 1 высокая сжимаемость передающей среды может быть достигнута не только за счет внесения газовых включений в воду, но и при $\beta \le 10^{-2}$ за счет капсуляции воды в эластичную оболочку с $E < 10$ ГПа. При этом оказывается, что равновесная скорость звука в газожидкостной системе может быть заметно ниже скорости звука в отдельных компонентах системы, т. е. в газе и жидкости. Имеются однозначные экспериментальные подтверждения этого уникального свойства, отражающего повышенную сжимаемость многих релаксационных систем.

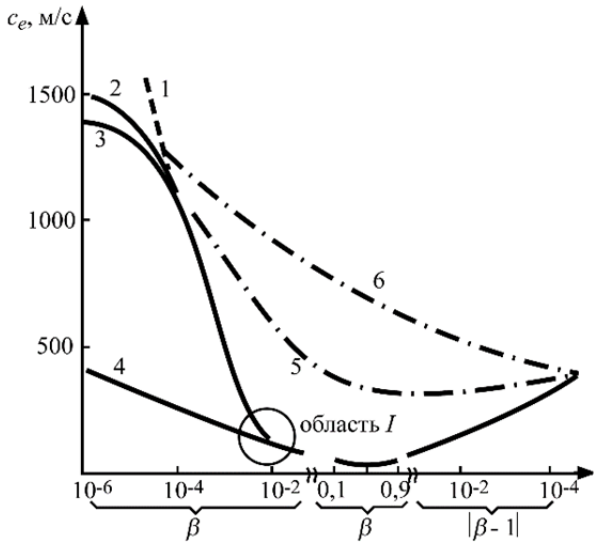


Рис. 1. Зависимость равновесной скорости звука в двухфазной среде от давления и сжимаемости стенок [5–10]: линия 1 – P_0 = 0,1 МПа для несжимаемой жидкости; линия 2 – P_0 = 0,1 МПа для воды в трубе с несжимаемыми стенками; линия 3 – P_0 = 0,1 МПа для воды в стальной трубе; линия 4 – P_0 = 0,1 МПа для воды в полимерной оболочке; линия 5 – P_0=1 МПа и линия 6 – P_0 = 10 МПа для воды в трубе с несжимаемыми стенками

Fig. 1. The dependence of the equilibrium speed of sound in a two-phase medium on the pressure and compressibility of the walls [5 ... 10]: line 1 – P_0 = 0.1 MPa for an incompressible fluid; line 2 – P_0 = 0.1 MPa for water in a pipe with incompressible walls; line 3 – P_0 = 0.1 MPa for water in a steel pipe; line 4 – P_0 = 0.1 MPa for water in a polymer shell; line 5 – P_0=1 MPa and line 6 – P_0= = 10 MPa for water in a pipe with incompressible walls

Ожидаемые пределы изменения перепада давления при отражении ударных волн на жесткой стенке в двухфазных средах

Необходимость предсказания уровней давления за отраженными ударными волнами на неподвижных жестких препятствиях обусловлена требованиями оценки нагрузок от ударных или взрывных волн. Для гомогенных изотропных сред (газ или жидкость) уровень давления за отраженными волнами описывается хорошо известными соотношениями. Так при движении волны давления с перепадом $\Delta P_1 = P_1 - P_0$ по несжимаемой среде встреча с жесткой стенкой приводит к появлению отраженной волны с перепадом давления $\Delta P_2 = P_2 - P_1$, причем $\Delta P_1 = \Delta P_2$ или $P_2 - P_0 = 2\Delta P_1$. Отсюда ясна известная связь $\Theta_2 + \Theta_1^{-1} = 2$, где $\Theta_2 = P_2/P_1$ и $\Theta_1 = P_1/P_0$. Здесь и далее P_2 – давление за отраженной волной.

В сжимаемой среде уровень давления за отраженной волной намного выше. Так в идеальном газе с соотношением удельных теплоемкостей γ $\Theta_2^{1/\gamma}$ $(\Theta_1^{1/\gamma} - 1)(\Theta_2^{1/\gamma} - 1)^{-1} = \Theta_1(\Theta_2 - 1)(\Theta_1 - 1)^{-1}$.

Максимальное повышение давления реализуется в изотермическом газе, когда $\Theta_2 = \Theta_1$. Однако в реальных системах, где $\gamma > 1$, всегда $\Theta_2 < \Theta_1$. Так в идеальном газе при γ = const и $\Theta_1 \to \infty$ получаем $\Theta_2 = (3\gamma - 1)(\gamma - 1)^{-1}$. В запыленном газе, газожидкостной среде пенистой структуры, взвесях пузырьков газа в жидкости соотношение $\Theta_2 = f(\Theta_1)$ близко к таковому в газе при надлежащем выборе параметра соотношения теплоемкостей. Однако кажущееся на первый взгляд предельным соотношение $\Theta_2 = \Theta_1$ в ряде практически важных случаев не выполняется, так как для многих систем $\Theta_2 > \Theta_1$. Соотношение $\Theta_2 > \Theta_1$ выполняется в двухфазных системах пузырьковой структуры с конденсирующимся или быстрорастворимым газом в пузырьках. На рис. 2 представлена обобщенная диаграмма наблюдений возможных значений $\Theta_2 = f(\Theta_1)$ с учетом данных в [9]. Линия 1 построена для несжимаемой жидкости и является опорной. Линия 2 дает связь Θ_2 и Θ_1 в идеальном газе, где предельная степень повышения давления $\Theta_2 = (3\gamma - 1)/(\gamma - 1)$. Линия 3, где $\Theta_2 = \Theta_1$, получена для изотермического газа. Для волны давления, бегущей со скоростью D по двухфазной среде, состоящей из сжимаемой жидкости со скоростью звука C_f и включений газа, имеем $\Theta_2 = 1 + C_f(1 - \Theta_1^{-1})[(1 - \beta)D]^{-1}$. В пределе для сильных волн при $\Theta_1 > \infty$ получаем скорость волны давления $D \to C_f$ и тогда $\Theta_2 \to (2 - \beta)(1 - \beta)^{-1}$.

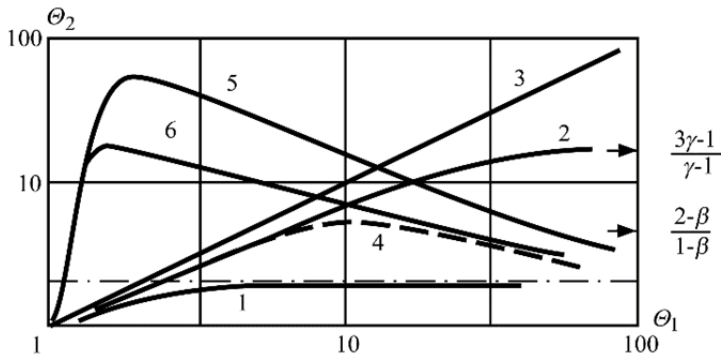


Рис. 2. Обобщенная диаграмма зависимости параметров отраженных волн от интенсивности падающей волны: линия 1 – несжимаемая жидкость без газовых включений; линия 2 – газ; линия 3 – несжимаемая жидкость с пузырями изотермического газа; линия 4 – сжимаемая жидкость с пузырями изотермического нерастворимого и неконденсирующегося газа; линии 5, 6 –двухфазные системы с пузырями растворимого газа или конденсирующегося пара

Fig. 2. A generalized diagram of the dependence of the parameters of the reflected waves on the intensity of the incident wave: line 1 — incompressible liquid without gas inclusions; line 2 – gas; LIne 3 – incompressible fluid with isothermal gas bubbles; line 4 – compressible liquid with bubbles of isothermal insoluble and non-condensable gas; lines 5, 6 – two-phase systems with bubbles of soluble gas or condensing vapor

Таким образом, в двухфазной среде связь $\Theta_2 = f(\Theta_1)$ представляется линией 4. Сначала при малых уровнях Θ_1 поведение двухфазной среды при ударном сжатии близко к поведению изотермического газа и $\Theta_2 = \Theta_1$. Затем разогрев газа в пузырях возрастает и их поведение при сжатии отлично от изотермического, т. е. $\Theta_2 < \Theta_1$ и величина Θ_2 лежит между линиями 2 и 3. При дальнейшем усилении волны (т. е. росте Θ_1) начинает проявляться сжимаемость жидкости, сначала за отраженной, а затем и за проходящей волной. Тогда при $\beta << 1$ получаем $\Theta_2 \to 2$ сверху опорной линии 1. Таким образом, зависимость $\Theta_2 = f(\Theta_1)$ в двухфазных средах имеет максимум по Θ_2 при некотором Θ_{1max}. В системах с пузырьками из растворимых или конденсирующихся газов (паров) наибольшие уровни Θ_2 характерны для слабых квазиакустических возмущений. Если интенсивность проходящей волны достаточна для полной конденсации или растворения паровых или газовых пузырьков, то

$$\frac{(\Theta_{2max}-1)_{H_2O}}{(\Theta_{2max}-1)_f} = \sqrt{\frac{(\rho c^2)_{H_2O}}{(\rho c^2)_f}},$$

$$\Theta_2 = 1 + \Psi\Theta_1^{-1}(\Theta_1 - 1)^{0,5}$$

при $\Psi = \left\{\beta\rho_f C_f^2\left[(1-\beta)P_0\right]^{-1}\right\}^{0,5}$.

Максимальная величина $\Theta_2 = 1 + 0,5\Psi$ достигается при $\Theta_1 \approx 2$.

Экспериментальные исследования [9–17] подтвердили достижение максимальных значений Θ_2 при $1,2 < \Theta_1 < 3$, причем $\Theta_2 > \Theta_1$. Это показано на диаграмме рис. 2 линиями 5 и 6 для двухфазной среды с переменной массовой

долей газа при двух значениях объемного содержания газа в жидкости β_{15} (линия 5) и β_{16} (линия 6), причем $\beta_{15} > \beta_{16}$. Табл. 1 дает представление о максимальном уровне коэффициента повышения давления при отражении в системе с полной конденсацией паровых включений за проходящей ударной волной для случая, когда несущая жидкость – вода.

Предельный уровень $\Theta_{2\lim} \to (2-\beta)(1-\beta)^{-1}$ при $\Theta_1 \to \infty$ характерен для любых двухфазных систем.

Практическая важность описанных вариаций акустических свойств двухфазных газожидкостных систем и изменения параметров отраженных импульсов давления до сих пор не принимается во внимание при реализации технологических процессов штамповки взрывом [18]. Пренебрежение учетом влияния малой объемной (и, тем более, массовой) доли газовых включений в объеме передающей динамическую нагрузку жидкой среды на ее сжимаемость способствует неправильной оценке амплитудно-частотных характеристик технологического цикла. Это ведет к излишним материальным затратам из-за преждевременного износа оборудования.

Таблица 1

Максимальный уровень коэффициента повышения давления Θ_{2max} при отражении ударных волн в газожидкостной среде на жесткой стенке

Maximum level of coefficient of increase in pressure Θ_{2max} upon reflection of shock waves in a gas-liquid medium on a rigid wall

β \ P_0	0,1 МПа	1 МПа	10 МПа
10^{-2}	8,5	3,87	1,75
10^{-1}	23,5	9,61	3,25
0,5	76	48,4	7,5

Разработанные базовые модели динамики ударных волн в газожидкостных средах и накопленный банк данных, полученных в ходе проведения и обобщения экспериментов по взаимодействию ударных волн с биологическими объектами и элементами конструкций, может быть реализован в современных модулях информационной поддержки взрывных технологий, позволяющих оперативно реагировать на чрезвычайные ситуации и принимать адекватные решения при ликвидации их последствий.

Реальные возможности регулирования параметров взрывных волн при детонации зарядов ВВ в различных средах

Накопленный багаж расчетных и экспериментальных данных об интенсивности взрывных волн, генерируемых зарядами ВВ в гомогенных и гетерогенных системах, позволяет указать диапазон ожидаемых величин перепада давления при переходе от одной среды к другой. На сводном графике рис. 3 указаны величины перепада давления на фронте взрывной волны после взрыва заряда ВВ (тротил)

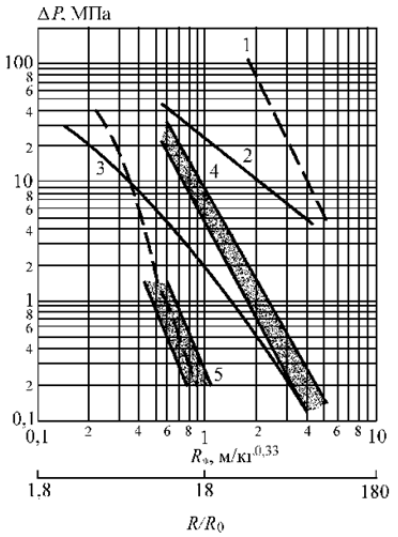


Рис. 3. Сводный график зависимости перепада давления взрывной волны для различных сред [4]:
1 – плотный грунт; 2 – дегазированная вода; 3 – воздух; 4 – пористый грунт; 5 – водномеханическая пена

Fig. 3. The summary graph of the pressure drop of the blast wave for various environments [4]:
1 – dense soil; 2 – degassed water; 3 – air; 4 – porous soil; 5 – water-mechanical foam

в плотном грунте с минимальным числом газовых включений (линия 1), в дегазированной воде (линия 2) и в воздухе (линия 3). Все графики построены при начальном давлении $P_0 = 0{,}1$ МПа. Введение газовых пор по объему до $\beta \le 10$ % ведет к снижению уровня амплитуд взрывных волн. Заштрихованная полоса значений перепадов давления (4) показывает, что при замене плотного грунта на пористый наполнитель уровень давления может понизиться до 100 раз. Переход от сплошной жидкости к системе типа пузырьки газа + жидкость также приводит к резкому снижению величины ΔP вплоть до уровня перепада давления, характерного для чистого газа (это наблюдается при объемной доле пузырьков ($\beta > 1$ %). Больший наклон зависимостей $\Delta P = \Delta P(R_*)$ в системах пузырьки газа + жидкость, также попадающих в заштрихованную зону (4), свидетельствует об усилении диссипативных процессов. Однако зависимость $\Delta P = \Delta P(R_*)$ для газа (линия 3) не является предельной. Еще меньшие значения перепада давления ΔP достижимы при проведении взрывов ВВ в высокократной газожидкостной пене при концентрации жидкости $\sigma = (5...50)$ кг/м^3 (полоса значений 5). Сопоставление зависимости $\Delta P = \Delta P(R_*)$ для воздушного взрыва (3) и взрыва в пористом грунте (зона 4) показывает, что при $R_* = 4...6$ м/кг^{0,33} ($R/R_0 \approx 70...100$) амплитуды квазиакустических возмущений давления в воздухе и в пористом грунте почти сравниваются. При $R/R_0 \approx 150...200$ ($R_* \approx 10$ м/кг^{0,33}) амплитуда квазиакустической волны в газе больше таковой в пористом грунте. Здесь R_0 – радиус заряда ВВ весом G, так что приведенный линейный масштаб для расстояния R в весовых переменных Садовского–Гопкинсона составляет $R_* = R/G^{0,33}$.

Динамическое поведение ударных волн в релаксационных системах

Эффективные методы локализации действия взрыва и технические средства на их основе созданы за счет использования в качестве локализующих газожидкостных сред типа водно-механических пен и пузырьковых систем. Динамическое поведение ударных волн в указанных релаксационных системах качественно отличается от распространения ударных волн в гомогенных средах типа газа и жидкости. Это связано с наличием развитых **релаксационных зон** межфазного взаимодействия газа с жидкостью и аномально высокой сжимаемостью газожидкостных систем по сравнению либо с жидкостью, либо с газом. Характерной особенностью ударно-волновых процессов в газожидкостных средах является резкая зависимость параметров ударных волн от глубины протекания **релаксационных процессов**. Динамика ударно-волновых процессов при взрыве в дисперсных средах осложнена процессами межфазного взаимодействия, что затрудняет теоретический анализ ударно-волновых процессов в этих средах и требует проведения широких экспериментальных исследований. Принципиальным являлось определение асимптотических решений, описывающих не только начальную стадию взрыва, но и динамику поздней стадии затухания ударных волн в области квазиакустики при замороженных процессах релаксации или при термодинамическом равновесии между газовой и жидкой фазами.

Недостаточная изученность защитных свойств газонаполненных систем приводит к неполному использованию представляемых ими возможностей. Так при ведении взрывных работ в акваториях распространена схема защиты пузырьковыми шлейфами как на рис. 4. Это типичный пример отстраненного пузырькового экрана, когда взрыв производится в воде и взрывная волна достигает экран через слой жидкости (воды). Снижение взрывных нагрузок оказалось бы более эффективным при погружении источника взрыва в пузырьковый шлейф, как это предложено в [19, 20] и проиллюстрировано на рис. 5, *а* на примере подводного взрыва линейных зарядов ВВ. В отсутствие пузырькового локализатора датчики давления 1 и 2 фиксировали типичную взрывную волну с амплитудой около (25 ± 5) МПа (на удалении 1 м) и (8,6 ± 1) МПа (на удалении

1,5 м) как на рис. 5, *б*. При взрыве внутри шлейфа вместо взрывной нагрузки получали растянутый во времени хаотический волновой пакет со значительно меньшим уровнем возмущений давления. Таким образом, в схеме проведения взрывных работ по схеме рис. 4 упущена просто реализуемая возможность дополнительного подавления и трансформации гидроимпульсных нагрузок.

Рис. 4. Схема защиты береговых сооружений пузырьковым экраном при ведении технологических операций на реке Мозыль (ФРГ) по [1]

Fig. 4. Scheme of protection of coastal facilities with a bubble screen when conducting technological operations on the Mozyl River (Germany) according to [1]

Преобразование подводных взрывных нагрузок низкочастотными слоями

Взрывные волны подводного взрыва ВВ почти всегда попадают в разряд акустических возмущений давления. Однако уровень абсолютных значений амплитуды таких волн велик, и они представляют реальную опасность для биообъектов, погруженных в жидкость. В отношении акустических импульсов, какими являются подводные взрывные волны, понятие ослабления волн является неточным. Более уместно говорить о способах изменения (трансформации) вида гидровзрывной нагрузки. Поставленная задача достаточно успешно решается с помощью релакационных газонаполненных экранов, воздвигаемых в жидкости на пути движения взрывной волны. Совокупность известных сведений о взаимодействии подводных взрывных волн с защитными пузырьковыми экранами [20–22] или с газонаполненными экранами из пористых полимерных материалов [23] позволяет различать два типа трансформации возмущений давления под водой:

трансформация взрывной нагрузки экраном, контактирующим с защищаемым объектом → присоединенный защитный экран **(ПзЭ)**;

трансформация взрывной нагрузки экраном, удаленным от защищаемого объекта → отстраненный защитный экран **(ОзЭ)**.

Типичные примеры трансформации профиля давления во времени для подводной взрывной волны в случаях использования ПзЭ или ОзЭ показаны на рис. 4.

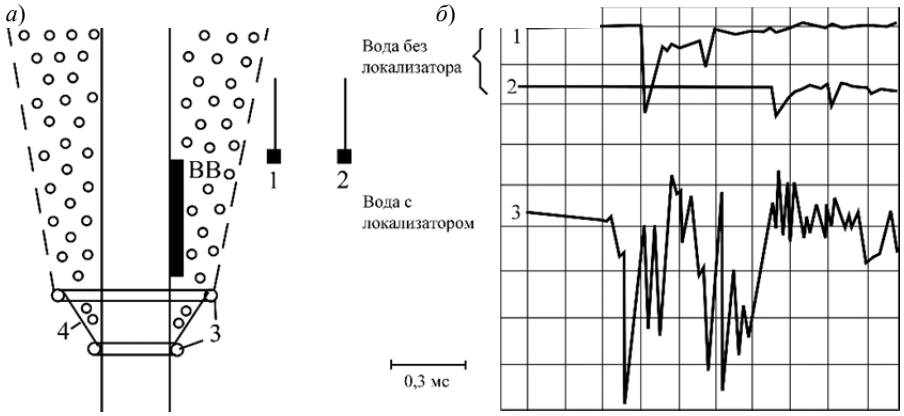


Рис. 5. Схема защиты акватории от взрыва заряда ВВ, погруженного в двухфазную среду вода-пузырьки воздуха по [23]:

1, 2 – гидрофоны, 3 – перфорированные газо-подводящие коллекторы, 4 – ограничительные сетки

Fig. 5. The scheme of protection of the water area from the explosion of an explosive charge immersed in a two-phase medium of water-air bubbles according to [23]:

1, 2 – hydrophones, 3 – perforated gas supply manifolds, 4 – restrictive grids

Преобразование подводных взрывных нагрузок присоединенными защитными экранами

Типичная взрывная волна с непрерывно убывающим давлением за фронтом преобразуется после выхода из воды и пересечения пузырькового ПзЭ в волновой пакет (рис. 6). ПзЭ (1) толщиной 80 мм образован потоком воздуха из системы отверстий (3). Амплитуда волны в воде перед экраном $\Delta P_1 \approx 0{,}2$ МПа. Внутри ПзЭ (датчик давления 4) взрывная волна растягивается во времени из-за снижения скорости звука в пузырьковом шлейфе. Масштаб времени отмечен на рисунке. На стенке сосуда за ПзЭ датчик давления 5 фиксирует усиленные до уровня $\Delta P_1 \approx (0{,}5...0{,}7)$ МПа колебания давления в течение времени $\approx 10^{-3}$ с. Без экрана датчик 5 фиксирует только отраженную волну с амплитудой около 0,4 МПа, как при акустическом взаимодействии в дегазированной воде падающей волны со стенкой. Таким образом, ПзЭ не выполняет предполагаемую защитную функцию. Возможность реализации описанного эффекта предсказана в [22].

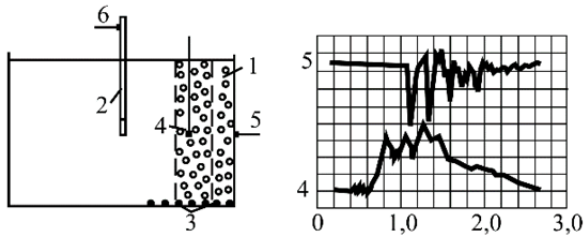


Рис. 6. Преобразование подводной трехмерной взрывной нагрузки в слое, присоединенном к преграде [2]:

1 – пузырьковый слой (подвижные пузыри); 2 – источник взрывной волны; 3 – генератор пузырей; 4, 5, 6 – датчики давления

Fig. 6. Transformation of an underwater three-dimensional explosive load in a layer attached to an obstacle [2]:

1 – bubble layer (moving bubbles); 2 – source of a blast wave; 3 – bubble generator; 4, 5, 6 – pressure sensors

Преобразование подводных взрывных нагрузок отстраненными защитными экранами

Типичная взрывная волна с теми же исходными параметрами, что в примере с ПзЭ проникает из воды в пузырьковый ОзЭ, отодвинутый от стенки на расстояние ≈ 200 мм – схема (рис. 7). Внутри экрана по показаниям датчика 4 скорость нарастания давления уменьшилась и время достижения максимального значения составляет $\approx 0{,}5 \cdot 10^{-3}$с. За ОзЭ датчик давления 5 на стенке фиксирует заметно ослабленные колебания давления. Общее представление о колебательном процессе в экране и на стенке дают показания датчиков на нижнем и верхнем лучах рис. 7, *б* соответственно. Если экрана в воде нет, то волновая картина упрощается и имеет вид как на рис. 7, *в*. Результаты лабораторных опытов с ПзЭ и ОзЭ нашли свое подтверждение для подводного взрыва ВВ [19], отмечены в крупномасштабных испытаниях [20] и воспроизведены в опытах с экранами из пористых полимерных материалов [23].

Отмеченные особенности преобразования взрывных волн отстраненным пузырьковым экраном наблюдались и в случае прохождения взрывной волны по заполненному водой каналу [22] на примере трансформации гидровзрывной нагрузки, создаваемой подводным электрическим разрядом. Трансформация нагрузки происходила в отстраненном от торца канала слое неподвижных наполненных воздухом резиновых шариков диаметром 7 мм. Длина слоя шариков менялась в интервале (1...30) см. Объемная доля полостей в пространстве, оккупированном шариками, $\beta = 1...30$ %. Как и в сферическом случае взрывная волна в слое преобразуется в низкочастотный волновой комплекс с пониженной амплитудой давления. Универсальность демпфирования коротковолновой гидровзрывной нагрузки газонаполненными слоями с пониженной скоростью звука подтверждена при создании нового поколения локализаторов

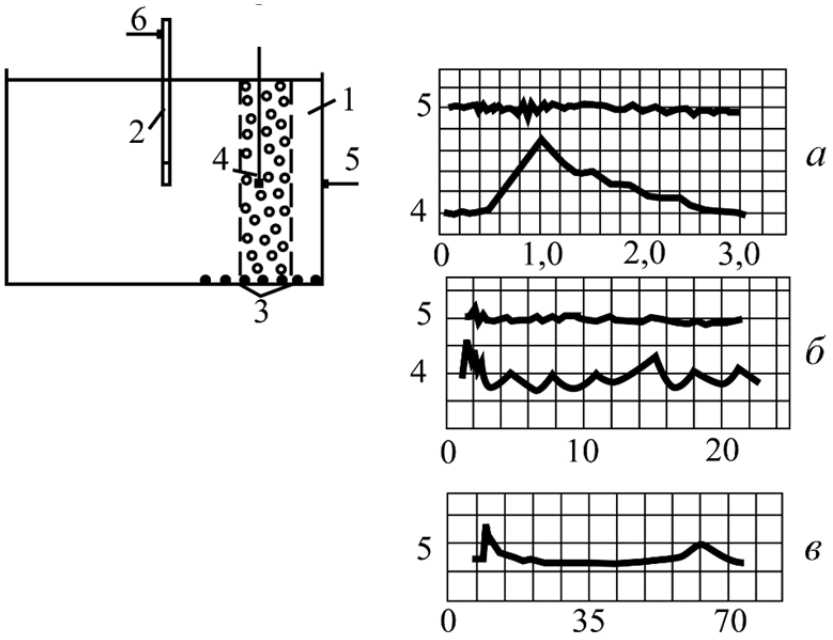


Рис. 7. Преобразование подводной трехмерной взрывной нагрузки пузырьковым слоем отодвинутым от преграды [2]:

1 – пузырьковый слой (подвижные пузыри); 2 – источник взрывной волны; 3 – генератор пузырей; 4, 5, 6 – датчики давления

Fig. 7. Conversion of an underwater three-dimensional explosive load with a bubble layer moved away from the barrier [2]:

1 – bubble layer (moving bubbles); 2 – source of a blast wave; 3 – bubble generator; 4, 5, 6 – pressure sensors

воздушного взрыва [24] и интересными опытами в [25]. В [25] низкочастотный промежуток в заполненном водой канале создавался за счет встроенной в стенки канала податливой газонаполненной пластины. Отмечается слабое затухание взрывной нагрузки в канале с жесткими стенками по амплитуде и сохранение формы сигнала на всем участке измерения. При наличии встроенной в стенку канала податливой пластины отмечено существенное (до 10 раз по амплитуде) ослабление сигнала и трансформация взрывной волны в растянутый во времени импульс сжатия.

Во всех опытах, где отмечено ослабление гидровзрывной нагрузки и трансформация профиля волны давления, скорость звука в ОзЭ (около 100 м/с) существенно ниже, чем в среде перед и за экраном (около 1500 м/с). Весь комплекс вопросов об оптимальном использовании релаксационных газонаполненных слоев для защиты от подводных взрывных нагрузок остается, далек от полного рассмотрения.

Структурированные релаксационные системы для защиты от внешних воздействий

В [13–17] исследованы динамические процессы в структурированной трехфазной релаксационной системе жидкость + пузырьки газа (пара) + эластичный пористый каркас. В [13–17] каркас образован пенистым полимерным материалом с объемной плотностью $\sigma \approx (25 \pm 5)$ кг/м^3, например, пенополиуретаном. В [26] каркас сформирован сотообразной структурой из тонкой алюминиевой фольги с объемной плотностью $\sigma \approx 25$ кг/м^3.

Наличие пенообразного или сотового скелета в жидкости предотвращает перемещение жидкости и устраняет вредное смещение центра тяжести при ускорении или замедлении движения аппаратов с баками, наполненными жидкостью. При наличии в емкости границы раздела газ – жидкость устраняется появление волн на свободной поверхности. Использование в качестве внутреннего наполнителя легкого тонкостенного теплопроводящего металла (алюминия) с развитой удельной поверхностью (около 48,7 г/см^2) заметно отражается на тепловой инерции жидкости при внешнем нагреве. В итоге предложена оригинальная система предотвращения взрывов сосудов для хранения и транспортировки легкокипящих горючих жидкостей и сжиженных газов [26]. В том числе следует обратить внимание на повышенную устойчивость топливных баков со скелетообразующим наполнителем к действию зарядов простых и кумулятивных зарядов ВВ.

Результаты подавления взрывных нагрузок в жидкости нашли полезное применение для защиты топливных баков летательных аппаратов от гидроудара при внешнем импульсном воздействии через стенки бака на объем горючего. В [19] описана простая система подавления опасных колебаний давления в массе горючего за счет принудительного подвода в объем бака негорючих газовых пузырьков. Отмеченное при этом снижение амплитуды и характера колебаний давления соответствовало измерениям, описанным в [19, 20].

Релаксационные структуры для подавления вибрационных и колебательных воздействий

Снижение вибраций и колебательных воздействий представляет собой в ряде случаев важную техническую задачу, которая может быть решена с применением структурированных релаксационных структур. В Исследовательском центре им. М. В. Келдыша предложены демпферы из металлорезины для эффективного снижения уровня вибраций промышленных машин, трубопроводов или иных технических устройств [27]. Металлорезина представляет собой вязкоупругий газонаполненный металлический материал волоконной структуры, превосходящий по своим эксплуатационным свойствам демпферы из вспененной резины [28]. Демпферы из металлорезины снижают уровень вибраций энергонасыщенных технических устройств в 6...10 раз в диапазоне частот от 1 Гц до 7000 Гц при ничтожных затратах на эксплуатацию.

Применение импульсных энергетических технологий при демонтаже загрязненного оборудования

В последние годы накоплен уникальный опыт внедрения взрывных технологий на основе УКЗ при проведении специальных ликвидационных работ на ЧАЭС и в зоне отчуждения вокруг нее.

Специальные исследования не выявили негативного влияния повышенного радиоактивного фона на работоспособность ВВ и средств инициирования. Штатные электродетонаторы ЭДУ-1 оказались работоспособными при воздействии импульса мощностью 10^6 Р/с при экспозиционной дозе излучения до 10^4 Р. Ликвидационные приспособления на основе УКЗ и детонаторов ЭД-8Ж успешно использованы в 1986 г. при резке трубопроводов на 4-ом блоке ЧАЭС при уровне радиации около 150 Р/час. Актуальность исследований по поиску методов и эффективных средств подавления ударных волн, резко возросла в последние годы в связи с участившимися террористическими актами. В этом отношении локализаторы действия взрыва должны обеспечить защиту персонала и оборудования при консервации и ликвидации взрывоопасных предметов и устройств.

Несмотря на понятную аллергию к импульсным методам, связанную с применением ВВ, взрывные технологии при демонтаже загрязненного оборудования посредством УКЗ имеют неоспоримые преимущества перед традицион-

ными методами ввиду своей дистанционности, оперативности реализации. Устраняется необходимость долговременного присутствия персонала в опасных зонах для выполнения ликвидационных мероприятий. Разработанные системы локализации действия подводного и наземного взрывов нашли применение при ликвидации аварий на нефтяном и газопроводном транспорте, для утилизации и разделения металлоконструкций в 30-километровой зоне ЧАЭС, ликвидации последствий аварий на морских платформах и демонтаже гидротехнических сооружений на акваториях Каспийского, Черного и Азовского морей. Предложенные технические средства ведения подводных взрывных работ в свое время были допущены к применению специальным Распоряжением Совета Министров СССР. Разработанные модули информационной поддержки взрывных технологий и импульсные системы разделения конструкций с рекомендованными средствами защиты позволили использовать их в качестве эффективных технических средств для ликвидации последствий аварии на ЧАЭС.

Использование особых амплитудно-частотных свойств релаксационных систем в импульсных энергетических технологиях

Разработанные лабораторные экспериментальные установки и методики исследования параметров ударных волн при взрыве в газе, жидкости и газожидкостных средах пенистой и пузырьковой структуры позволили провести прямое сопоставление фугасного действия взрыва в различных по структуре и термодинамическим свойствам средах.

Накопленный экспериментальный материал послужил основой при создании базы данных для разработки эффективных локализаторов взрыва и позволил проверить достоверность физических и математических моделей динамического поведения релаксационных систем при взрыве конденсированных ВВ.

Установленные опытные зависимости и разработанные на их основе методики определения поражающего действия взрыва послужили основой для создания прикладных программ определения допустимых расстояний при ведении работ в особых условиях радиационных загрязнений и в пожаровзрывоопасной среде при ликвидации последствий аварий и катастроф на объектах ядерной энергетики, системах нефтяного и газопроводного транспорта.

Представлены научно-обоснованные рекомендации для разработки мобильных средств защиты от ударных волн, что расширило область практического использования энергии взрыва при резке, обработке и сварке взрывом. Применение релаксационных систем как рабочего тела для локализаторов взрыва привело к устранению опасности термического действия огненных шаров и подавлению пылеобразования при ведении взрывных работ.

Пакеты прикладных программ для определения технологических параметров локализаторов взрывов и допустимых расстояний по фугасному воздействию на биологические объекты и конструкции пригодны для решения обратных задач взрыво-технической экспертизы несанкционированных взрывов при авариях и террористических актах.

Созданы мобильные локализаторы действия взрыва и экологически чистые системы разделения конструкций на их основе расширили область применения технологических процессов резки, сварки и обработки металлов взрывом. Методы и технические средства подавления ударных волн перспективны при создании безопасных технологий разделения конструкций, незаменимы в аварийных ситуациях на нефтегазопроводном транспорте и ликвидации последствий аварии на АЭС, демонтаже гидротехнических сооружений и морских стационарных платформ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Гельфанд Б.Е., Сильников М.В.** Фугасное действие взрывов. СПб.: Астерион. 2007. 250 с.

[2] **Гельфанд Б.Е., Сильников М.В.** Барометрическое действие взрывов. СПб.: Астерион. 2006. 657 с.

[3] **Mori Y., Hijikata K., Komine A.** Propagation of pressure waves in two phase flow // International J. of Multiphase flow. 1975. Vol. 1, no. l. P. 139–152.

[4] **Hijikata K., Mori Y., Takahashi Y.** Study of shock wave in liquid metal two-phase mixture with and without magnetic field // Nuclear Engineering and Design. 1985. Vol. 95, no. 3. P. 343–352.

[5] **Aoki T., Takagaki T., Miyazato Y., Matgsuo K.** Weak shock wave propagating through bubbly flow in vertical pipe // Proc. of Symposium on shock waves, Japan-99. Ayoma Gakuin University, Sibuya, 1999. P. 497–500.

[6] **Гельфанд Б.Е., Губин С.А., Когарко С.М., Тимофеев Е.И.** Определение скорости распространения низкочастотных звуковых возмущений в смеси жидкости с пузырьками газа // ТВТ. 1975. Т. 13, № 4. С. 891–892.

[7] **Ngyeyh D.L., Vinter E.R., Greimer M.** Sonic velocity in two-phase system // International J. of Multiphase flow. 1981. Vol. 7, no. 3. P. 311–320.

[8] **Гельфанд Б.Е., Медведев С.П., Поленов А.Н.** Измерение скорости слабых возмущений в пористых средах насыпной плотности // ЖПМТФ. 1986. № 1. С. 141–144.

[9] **Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Нигматулин Р.И., Рахматуллин Х.А., Тимофеев Е.И.** Усиление ударных волн в жидкостях с пузырьками пара и растворяющегося газа // Докл. АН СССР. 1982. Т. 263, № 3. С. 594–598.

[10] **Тимофеев Е.И., Губанов А.В., Гельфанд Б.Е., Цыганов С.А.** О возможности неакустического отражения слабых волн давления в кипящей жидкости // Докл. АН СССР. 1981. Т. 257, № 5. С. 1125–1127.

[11] **Гельфанд Б.Е., Губанов А.В., Тимофеев Е.И.** Об отражении ударных волн на жёсткой стенке в двухфазных средах с переменной массовой концентрацией газа // Изв. АН СССР: МЖГ. 1982. № 2. С. 159–162.

[12] **Накоряков В.Е., Вассерман Е.С., Покусаев Б.Г., Прибатурин Н.А.** Усиление амплитуды волн давления в парожидкостной среде пузырьковой структуры // ТВТ. 1994. Т. 32, № 3. С. 411–417.

[13] **Прибатурин Н.А., Стасенко Д.П.** Исследование возможности интенсификации насыщения жидкостей газом путём воздействия ударных волн // ЖПМТФ. 2000. Т. 41, № 2. С. 64–70.

[14] **Накоряков В.Е., Донцов В.Е.** Усиление ударных волн в насыщенной пористой среде // Доклады Академии Наук. 2000. Т. 373, № 4. С. 477–478.

[15] **Покусаев Б.Г., Донцов В.Е.** Ударные волны и массообмен за ударными волнами в пузырьковой среде // Теоретические основы химической технологии. 1999. Т. 33, № 5. С. 485–494.

[16] **Dontsov V.E., Pokusaev B.G.** Reflection of shock waves near rigid wall in particles + liquid suspension with gaseous bubbles // Acoustical Journal. 1999. Vol. 45, no. 1. P. 82–87.

[17] **Донцов В.Е., Накоряков В.Е.** Распространение ударных волн в пористой среде, насыщенной жидкостью с пузырьками растворимого газа // ЖПМТФ. 2000. Т. 41, №5. С. 91–102.

[18] **Пихтовников Р.В., Хохлов Б.А.** Безбассейновая листовая штамповка взрывом. Харьков: Прапор. 1972. 165 с.

[19] **Гельфанд Б.Е., Губанов А.В., Губин С.В., Кудинов В.М., Паламарчук Б.И., Подгребенков А.Л., Попов О.Е., Тимофеев Е.И.** Затухание ударных волн в двухфазной среде жидкость–пузырьки газа // Изв. АН СССР: Механика жидкости и газа. 1977. № 1. С. 173–176.

[20] **Тимофеев Е.И., Гельфанд Б.Е., Гумеров А.Г., Кофман М.М., Поленов А.Н., Хомик С.В.** Влияние пузырькового экрана на ударно-волновое возмущение в жидкости // ФГВ. 1985. Т. 21, № 3. С. 98–102.

[21] **Гельфанд Б.Е., Губин С.А., Когарко С.М., Попов О.Е., Тимофеев Е.И.** Взаимодействие слабых сферических ударных волн с пузырьковым экраном // Известия АН СССР. МЖГ. 1976. №2. С. 85–89.

[22] **Кедринский В.К.** Гидродинамика взрыва. Эксперимент и модели. Новосибирск: СО РАН. 2000. 434 с.

[23] **Bjerne L.** Underwater explosion research based on model experiments // Problems of nonlinear acoustics / ed. by V.K. Kedrinsky. 1987. Pt. 2. P. 163–177.

[24] **Сильников М.В., Михайлин А.И., Орлов А.В.** Характеристики и применение локализаторов взрыва «Фонтан» // Вопросы оборонной техники. Серия 16. 2003. № 1/2. С. 40–45.

[25] **Klomfass A., Neuwald P., Thoma K.** Attenuation of underwater shock waves in ducts by air-filled

wall panels // Shock waves 200LCD ROM Proc. of 23-rd ISSW / ed. by F.K. Lu 2002, Paper No 1914. P. 1254–1261.

[26] Buffle material, explosion suppression, expanded aluminum mesh, for aircraft fuel tanks // MIL-B-87162A (USAF). 1994, 2IP.

[27] Виброгасители из металлорезины // Препринт. Исследовательский центр им М.В. Келдыша. МЛ 998. 3 с.

[28] **Guy T.B.** Attenuation of fluid noise in hydraulic machines by new energy absorption technique // Thermofluid Conference.Sydney. 1976. P. 63–69.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

СИЛЬНИКОВ Михаил Владимирович – *член-корреспондент РАН, академик РАРАН, доктор технических наук, профессор, генеральный директор ЗАО «Научно-производственное объединение Специальных материалов»*

E-mail: kashtano@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 01.10.2019

REFERENCES

[1] **B.Ye. Gelfand, M.V. Silnikov,** Fugasnoye deystviye vzryvov. SPb.: Asterion. 2007. 250 s.

[2] **B.Ye. Gelfand, M.V. Silnikov,** Barometricheskoye deystviye vzryvov. SPb.: Asterion. 2006. 657 s.

[3] **Y. Mori, K. Hijikata, A. Komine,** Propagation of pressure waves in two phase flow, International J. of Multiphase flow, 1 (1) (1975) 139–152.

[4] **K. Hijikata, Y. Mori,** Takahashi Y. Study of shock wave in liquid metal two-phase mixture with and without magnetic field, Nuclear Engineering and Design, 95 (3) (1985) 343–352.

[5] **T. Aoki, T. Takagaki, Y. Miyazato, K. Matgsuo,** Weak shock wave propagating through bubbly flow in vertical pipe, Proc. of Symposium on shock waves, Japan-99. Ayoma Gakuin University, Sibuya, (1999) 497–500.

[6] **B.Ye. Gelfand, S.A. Gubin, S.M. Kogarko, Ye.I. Timofeyev,** Opredeleniye skorosti rasprostraneniya nizkochastotnykh zvukovykh vozmushcheniy v smesi zhidkosti s puzyrkami gaza, TVT, 13 (4) (1975) 891–892.

[7] **D.L. Ngyeyh, E.R. Vinter, M. Greimer,** Sonic velocity in two-phase system, International J. of Multiphase flow, 7 (3) (1981) 311–320.

[8] **B.Ye. Gelfand, S.P. Medvedev, A.N. Polenov,** Izmereniye skorosti slabykh vozmushcheniy v poristykh sredakh nasypnoy plotnosti, ZhPMTF, 1 (1986) 141–144.

[9] **A.A. Borisov, B.Ye. Gelfand, R.I. Nigmatulin, Kh.A. Rakhmatullin, Ye.I. Timofeyev,** Usileniye udarnykh voln v zhidkostyakh s puzyrkami para i rastvoryayushchegosya gaza, Dokl. AN SSSR, 263 (3) (1982) 594–598.

[10] **Ye.I. Timofeyev, A.V. Gubanov, B.Ye. Gelfand, S.A. Tsyganov,** O vozmozhnosti neakusticheskogo otrazheniya slabykh voln davleniya v kipyashchey zhidkosti, Dokl. AN SSSR, 257 (5) (1981) 1125–1127.

[11] **B.Ye. Gelfand, A.V. Gubanov, Ye.I. Timofeyev,** Ob otrazhenii udarnykh voln na zhestkoy stenke v dvukhfaznykh sredakh s peremennoy massovoy kontsentratsiyey gaza, Izv. AN SSSR: MZhG, 2 (1982) 159–162.

[12] **V.Ye. Nakoryakov, Ye.S. Vasserman, B.G. Pokusayev, N.A. Pribaturin,** Usileniye amplitudy voln davleniya v parozhidkostnoy srede puzyrkovoy struktury, TVT. 1994. T. 32, № 3. S. 411–417.

[13] **N.A. Pribaturin, D.P. Stasenko,** Issledovaniye vozmozhnosti intensifikatsii nasyshcheniya zhidkostey gazom putem vozdeystviya udarnykh voln, ZhPMTF, 41 (2) (2000) 64–70.

[14] **V.Ye. Nakoryakov, V.Ye. Dontsov,** Usileniye udarnykh voln v nasyshchennoy poristoy srede, Doklady Akademii Nauk, 373 (4) (2000) 477–478.

[15] **B.G. Pokusayev, V.Ye. Dontsov,** Udarnyye volny i massoobmen za udarnymi volnami v puzyrkovoy srede, Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii, 33 (5) (1999) 485–494.

[16] **V.E. Dontsov, B.G. Pokusaev,** Reflection of shock waves near rigid wall in particles + liquid suspension with gaseous bubbles, Acoustical Journal, 45 (1) (1999) 82–87.

[17] **V.Ye. Dontsov, V.Ye. Nakoryakov,** Rasprostraneniye udarnykh voln v poristoy srede, nasyshchennoy zhidkostyu s puzyrkami rastvorimogo gaza, ZhPMTF, 41 (5) (2000) 91–102.

[18] **R.V. Pikhtovnikov, B.A. Khokhlov,** Bezbasseynovaya listovaya shtampovka vzryvom. Kharkov: Prapor. 1972.

[19] **B.Ye. Gelfand, A.V. Gubanov, S.V. Gubin, V.M. Kudinov, B.I. Palamarchuk, A.L. Podgrebenkov, O.Ye. Popov, Ye.I. Timofeyev,** Zatukhaniye udarnykh voln v dvukhfaznoy srede zhidkost–puzyrki gaza,

Izv. AN SSSR: Mekhanika zhidkosti i gaza, 1 (1977) 173–176.

[20] **Ye.I. Timofeyev, B.Ye. Gelfand, A.G. Gumerov, M.M. Kofman, A.N. Polenov, S.V. Khomik,** Vliyaniye puzyrkovogo ekrana na udarno-volnovoye vozmushcheniye v zhidkosti, FGV, 21 (3) (1985) 98–102.

[21] **B.Ye. Gelfand, S.A. Gubin, S.M. Kogarko, O.Ye. Popov, Ye.I. Timofeyev,** Vzaimodeystviye slabykh sfericheskikh udarnykh voln s puzyrkovym ekranom, Izvestiya AN SSSR. MZhG, 2 (1976) 85–89.

[22] **V.K. Kedrinskiy,** Gidrodinamika vzryva. Eksperiment i modeli. Novosibirsk: SO PAH. 2000.

[23] **L. Bjerne,** Underwater explosion research based on model experiments, Problems of nonlinear acoustics. Ed. by V.K. Kedrinsky, 2 (1987) 163–177.

[24]**M.V. Silnikov, A.I. Mikhaylin, A.V. Orlov,** Kharakteristiki i primeneniye lokalizatorov vzryva «Fontan», Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16, 1/2 (2003) 40–45.

[25] **A. Klomfass, P. Neuwald, K. Thoma,** Attenuation of underwater shock waves in ducts by air-filled wall panels, Shock waves 200LCD ROM Proc. of 23-rd ISSW. Ed. by F.K. Lu. 2002, Paper No. 1914 1254–1261.

[26] Buffle material, explosion suppression, expanded aluminum mesh, for aircraft fuel tanks, MIL-B-87162A (USAF). 1994, 2IP.

[27] Vibrogasiteli iz metalloreziny, Preprint. Issledovatelskiy tsentr im M.V. Keldysha. ML 998.

[28] **T.B. Guy,** Attenuation of fluid noise in hydraulic machines by new energy absorption technique, Thermofluid Conference. Sydney, (1976) 63–69.

THE AUTHOR

SILNIKOV Mikhail V. – *Special Materials Corp.*
E-mail: kashtano@yandex.ru

Received: 01.10.2019

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019

DOI: 10.18721/JEST.25306
УДК 658.512.4.07

И.Н. Хрусталева, С.А. Любомудров, Т.А. Ларионова, А.А. Толстолес

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА НА СУДОРЕМОНТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

В работе описана модель повышения эффективности технологической подготовки мелкосерийного и единичного производства. В основе модели лежит разбиение детали на отдельные элементарные поверхности с последующим анализом допустимых технологических методов и средств, применяемых при их обработке. Представленная модель технологической подготовки производства позволяет выбрать рациональный вариант технологического процесса изготовления партии деталей с учетом имеющегося производственного графика. Выбор оптимального варианта технологического процесса производится на основе сравнительного анализа сочетания различных вариантов методов и средств производства, применяемых в процессе производства детали. Рассмотрен пример выбора рационального варианта технологического процесса изготовления детали «Фланец». Представлена схема разбиения рассматриваемой детали на элементарные поверхности и объединения их в блоки поверхностей. На основе сравнительного анализа был выбран наиболее рациональный вариант.

Ключевые слова: автоматизация, средства производства, технологический процесс, сравнительный анализ, модель, механическая обработка.

Ссылка при цитировании:
Хрусталева И.Н., Любомудров С.А., Ларионова Т.А., Толстолес А.А. Повышение эффективности технологической подготовки производства на судоремонтных предприятиях // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 3. С. 86–96. DOI: 10.18721/JEST.25306

I.N. Khrustaleva, S.A. Lyubomudrow, T.A. Larionova, A.A. Tolstoles

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

IMPROVING EFFICIENCY OF TECHNOLOGICAL PREPARATION OF PRODUCTION IN SHIP REPAIR COMPANY

The article describes the model for improving the technological preparation of small-scale and single production. At the heart of the model is division of the part into separate elementary surfaces with subsequent analysis of the acceptable technological methods and means used in their processing. The presented model of technological preparation of production allows to choose the optimal variant of the technological process of manufacturing a batch of parts taking into account the available production schedule. The choice of the optimum variant of the technological process is made on the basis of comparative analysis of a combination of different methods and means of production used in the process of manufacturing the part. An example of the choice of the optimal variant of the technological process of manufacturing a "Flange" part is considered. A scheme is presented for splitting the part into elementary surfaces and combining them into blocks of surfaces. The optimal variant was chosen based on the comparative analysis.

Keywords: automation, means of production, technological process, comparative analysis, model, mechanical restoration.

Citation:
I.N. Khrustaleva, S.A. Lyubomudrow, T.A. Larionova, A.A. Tolstoles, Improving Efficiency of technological preparation of production in ship repair company, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 25 (03) (2019) 86–96. DOI: 10.18721/JEST.25306

Большинство судоремонтных предприятий работают в условиях единичного и мелкосерийного производства, которые имеют свои особенности [1]. Одной из особенностей производственных процессов на судоремонтных предприятиях является их индивидуальность, так как объем и наименование производимых работ определяется отдельно для каждого судна в зависимости от характера дефектов и степени износа узлов и отдельных деталей, что увеличивает трудоемкость этапа технологической подготовки производства (ТПП).

К основным задачам технологической подготовки производства можно отнести выбор рациональных методов получения заготовки и формообразования отдельных поверхностей детали, проектирование технологических маршрутов обработки, выбор средств технологического оснащения (технологическое оборудование, режущий инструмент, установочно-зажимные приспособления и др.), назначение режимов резания, формирование структуры технологических операций и оформление комплекта технологической документации.

Высокая трудоемкость ТПП в условиях единичного и мелкосерийного производства приводит к снижению производительности и значительному увеличению производственных затрат. Снижение трудоемкости ТПП возможно в результате ее комплексной автоматизации.

В научной литературе [2–18] рассмотрены различные модели по повышению эффективности технологической подготовки производства. В предложенных моделях не рассматривается многовариантность технологических процессов обработки партии деталей: различные варианты технологических маршрутов обработки, альтернативные варианты применения средств технологического оснащения. Также в описанных моделях ТПП не рассматривается вопрос выбора рациональных режимов резания. Предложенные в научной литературе модели ТПП не позволяют проанализировать множество вариантов обработки партии деталей и выбрать наилучшей на основе многокритериального анализа, что в значительной степени снижает качество и эффективность технологической подготовки производства, и в целом, всего производственного процесса.

Таким образом, целью работы является разработка модели, которая обеспечит повышение эффективности технологической подготовки производства на основе моделирования различных производственных сценариев.

Описание имитационной модели

Разработанная модель технологической подготовки производства является трехуровневой (рис. 1).

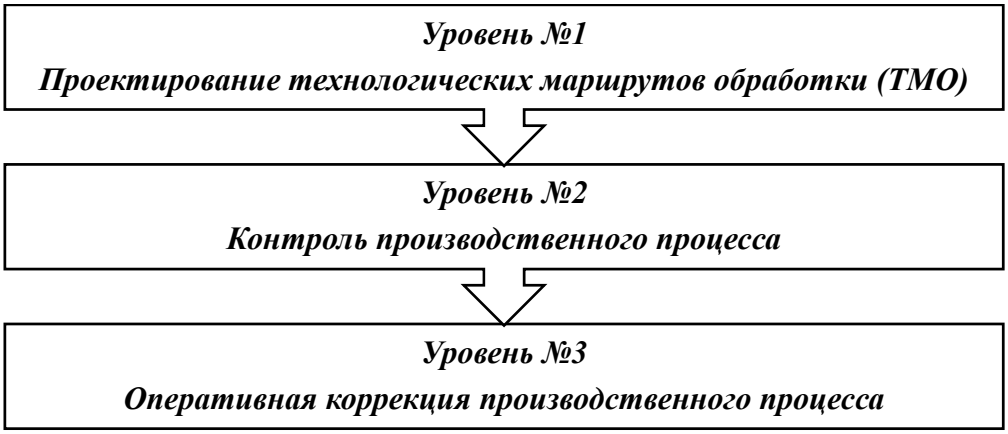


Рис. 1. Уровни имитационной модели
Fig. 1. Levels of the simulation model

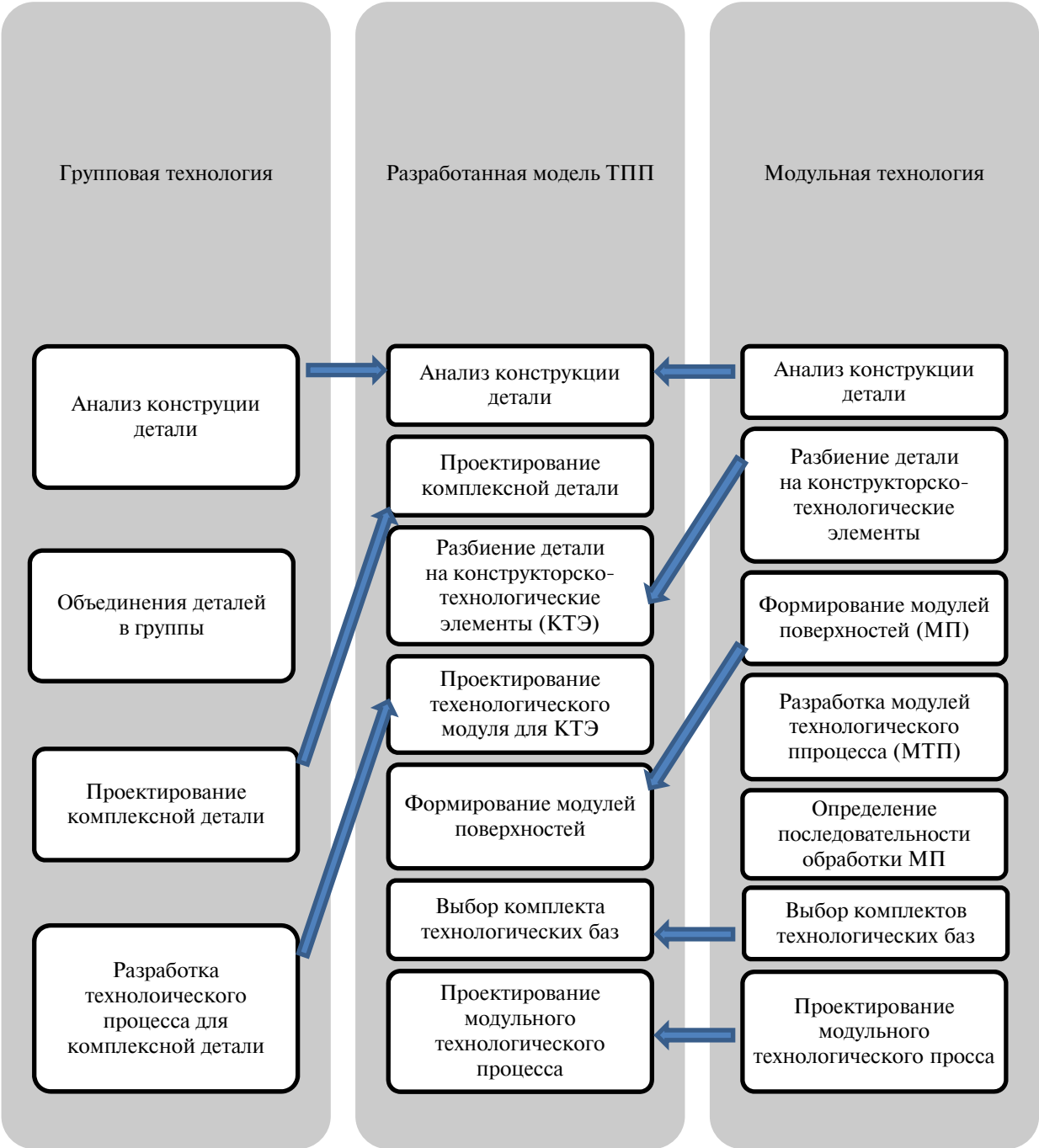


Рис. 2. Структура первого уровня имитационного моделирования
Fig. 2. The structure of the first level of simulation

На первом уровне производится проектирование и анализ различных технологических маршрутов обработки для партии деталей, выбор наилучшего варианта технологического маршрута обработки на основе многокритериального анализа. Имитационная модель включает в себя элементы двух метод проектирования технологических процессов (рис. 2): метод модульных технологий, описанный Б.М. Базровым [19] и метод группо-

вого технологического процесса, автором которого является С.П. Митрофанов [20, 21].

В структуру первого уровня моделирования были включены следующие элементы группового технологического процесса: проектирование комплексной детали и проектирование укрупненного маршрута обработки комплексной детали. Были включены следующие элементы модульной технологии: разбиение детали на конструкторско-технологические элементы, формирование блоков поверхностей, проектирование модуля технологического процесса изготовления элементарной поверхности.

Для оценки множества вариантов технологических процессов и выбора наилучшего варианта, были выбраны следующие критерии: длительность производственного цикла, величина погрешности обработки для наиболее точных размеров, величина переменных затрат.

Первый уровень моделирования можно разделить на 9 этапов (рис. 3), которые решают следующие задачи:

1. Анализ конструкции детали и постановка технологических задач;

2. Выбор типа заготовки и определение ее параметров;

3. Разбиение детали на конструкторско-технологические элементы, определение их параметров;

4. Определение комплектов технологических баз;

5. Формирование различных вариантов технологических операций;

6. Проектирование основного технологического маршрута обработки;

7. Проектирование альтернативных технологических маршрутов обработки;

8. Определение рациональных параметров резания на основе теоретического расчета погрешности обработки;

9. Определение для каждого варианта технологического процесса следующих параметров: длительности производственного цикла, погрешность обработки для наиболее точных размеров, величину переменных затрат;

10. Выбор наилучшего варианта технологического процесса для обработки партии детали на основе многокритериального анализа и расчета целевой функции.

11. Оформление комплекта технологической документации для наилучшего варианта технологического процесса.

Целью второго и третьего уровня имитационного моделирования является контроль и оперативная коррекция производственного процесса. Схема второго и третьего уровня моделирования представлена на рис. 4.

На втором уровне решаются следующие задачи:

1. Мониторинг работы каждой единицы технологического оборудования;

2. Анализ «узких мест» производства;

3. Контроль за выполнением производственного графика;

4. Моделирование альтернативных вариантов технологического процесса в случае возникновения сбоя в производственном процессе;

5. Принятие оперативных решений по стабилизации производственного графика на основе моделирования различных управленческих решений.

Задачей третьего уровня имитационного моделирования является оперативное внесение изменений в производственный график (постановка новых производственных задач), принятых на основе моделирования различных производственных сценарий.

Описание математической модели

Для реализации описанной имитационной модели были использованы четыре математических блока:

Блок 1. Определение нормы времени на операцию;

Блок 2. Определение величины переменных затрат;

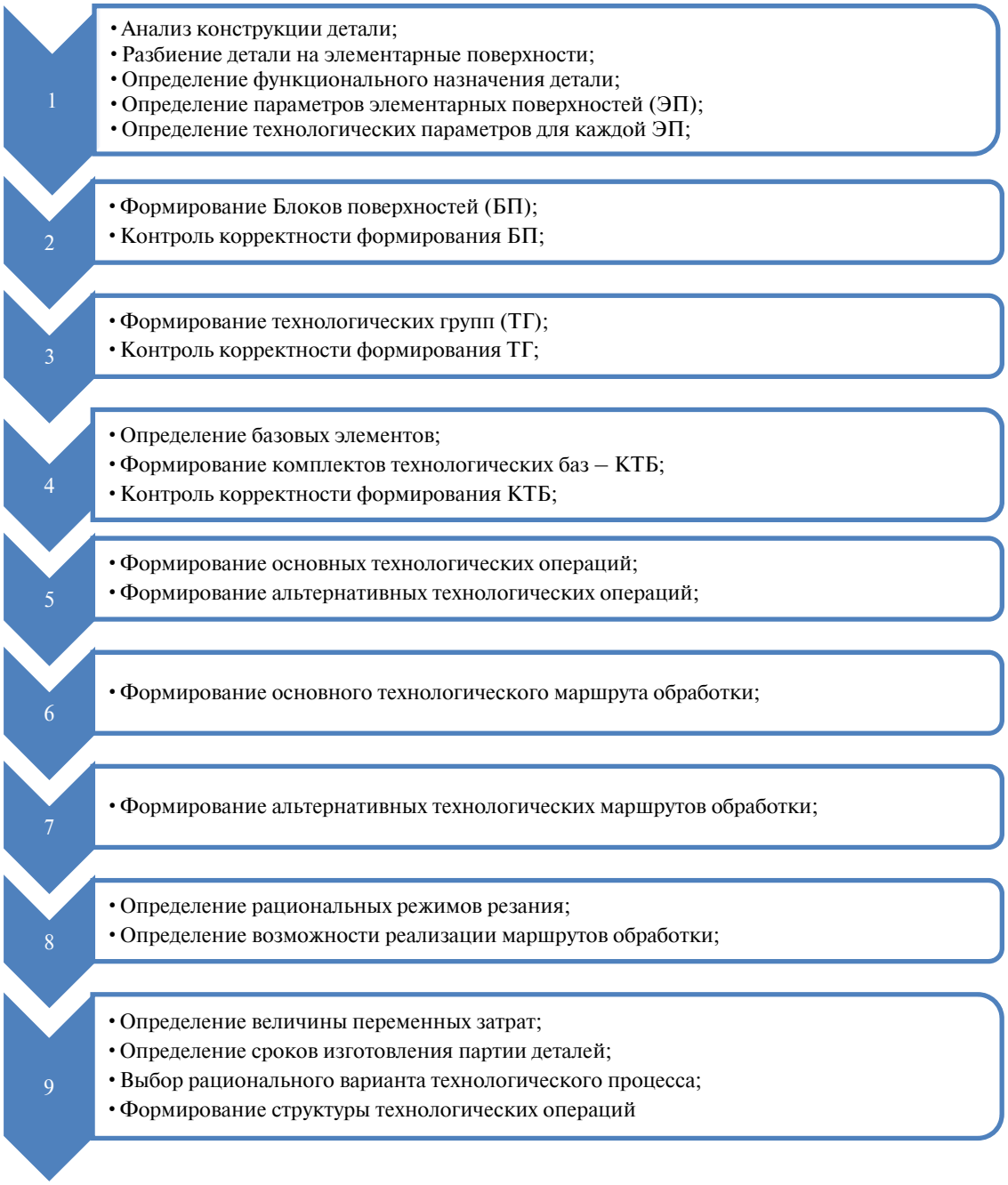


Рис. 3. Схема первого уровня имитационной модели технологической подготовки производства
Fig. 3. The Scheme of the first level of the simulation model of technological preparation of production

Блок 3. Определение погрешности обработки;

Блок 4. Определение значения целевой функции.

Блок 1. Определение нормы времени на операцию. Норма времени на операцию зависит от величин оперативного времени и подготовительно-заключительного времени, которые определяются по формулам [22]:

$$T_{\text{оп}} = T_{\text{шт}} + \frac{T_{\text{пз}}}{n}. \quad (1)$$

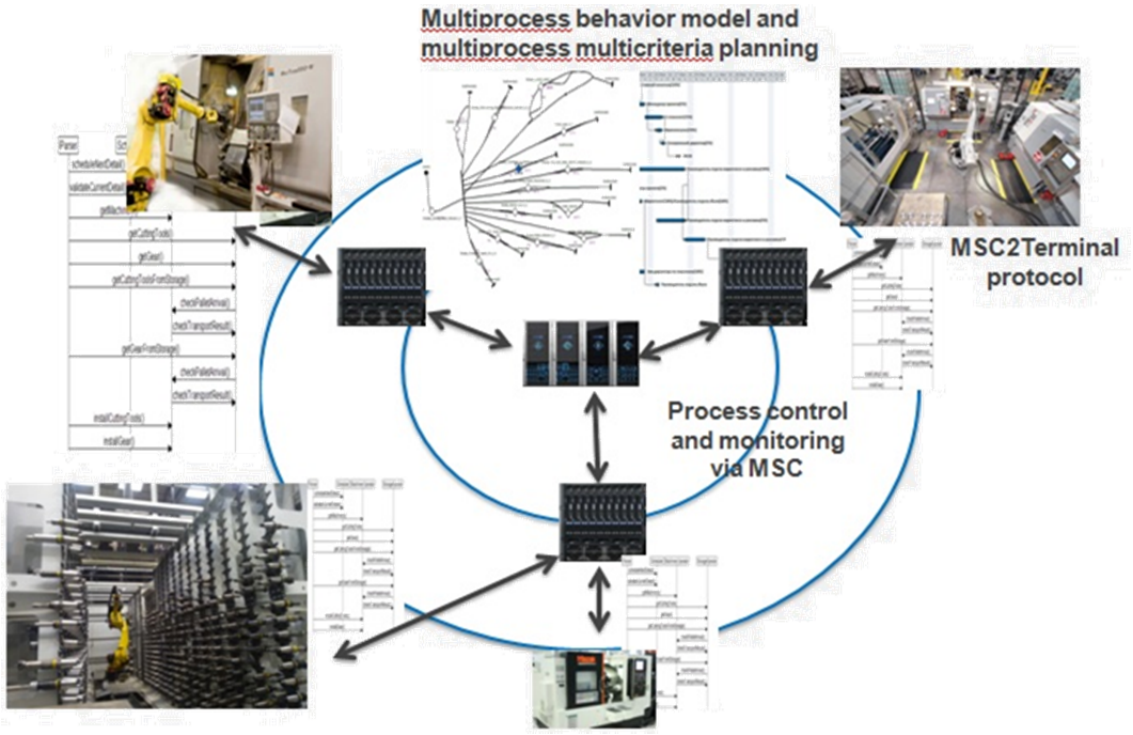


Рис. 4. Схема второго и третьего уровня моделирования
Fig. 4. The scheme of the second and third levels of modeling

Для оборудования без ЧПУ:

$$T_{шт} = \left(T_о + T_в\right)\left(1 + \frac{a_{обс} + a_{отл}}{100}\right); \quad (2)$$

$$T_о = \frac{l + l_1 + l_2}{nS} i. \quad (3)$$

Для оборудования с ЧПУ:

$$T_{шт} = \left(T_{ца} + T_в + k_в\right)\left(1 + \frac{a_{тех} + a_{орг} + a_{отл}}{100}\right); \quad (4)$$

$$T_{ца} = T_{оа} + T_{мв}; \quad (5)$$

$$T_{оа} = \sum_{i=1}^{n} \frac{L_i}{S_m}; \quad (6)$$

$$T_в = T_{в\,уст} + T_{в\,оп} + T_{в\,изм}; \quad (7)$$

$$T_{пз} = T_У + T_{пз2} + T_{пр\,обр}, \quad (8)$$

где $T_{оп}$ – норма времени на операцию, мин; n-количество деталей в партии, шт.; $T_о$ – основное время, мин; $T_в$ – вспомогательное время, мин; $a_{обс}$ – время обслуживания рабочего места, %; $a_{отл}$ – время на отдых и личные надобности, %; $T_{ца}$ – время автоматического цикла, мин; $k_в$ – коэффициент ручного вспомогательного времени; $a_{тех}$, $a_{орг}$ – время на техническое и организационное обслуживание, %; $T_{оа}$ – основное время автоматической работы станка по программе, мин; $T_{мв}$ – машинное вспомогательное время, мин.

Блок 2. Определение величины переменных затрат. Величина переменных затрат определяется на основе расчета трех параметров:

1. Затраты на оснастку (установочно-зажимное приспособление, режущий инструмент) – $З_{осн}$;
2. Затраты на заготовку – $З_{заг}$;
3. Затраты на оплату труда производственных рабочих – $З_{з/п}$.

$$З_{пер} = З_{осн} + З_{заг} + З_{з/п}; \quad (9)$$

$$З_{осн} = З_{пр} + З_{РИ}; \quad (10)$$

$$З_{ри} = \sum_{i=1}^{n}(N_{ри} \cdot С_{ри}) = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{t_{ри} n}{T_{ри}}\right) \cdot С_{ри}; \quad (11)$$

$$З_{пр} = \sum_{i=1}^{n} С_{пр}; \quad (12)$$

$$З_{заг} = С_{заг} n; \quad (13)$$

$$З_{з/п} = \sum_{i=1}^{m}\left(С_{нч} T_{пар}\right) = \sum_{i=1}^{m}\left(С_{нч}\left(T_{шт} n + T_{пз}\right)\right); \quad (14)$$

$З_{ри}$ – затраты на режущий инструмент; $З_{пр}$ – затраты на установочно-зажимные приспособления; $t_{ри}$ – время работы режущего инструмента, необходимого для обработки одной детали, мин.; n- количество деталей в партии, шт.; $T_{ри}$ – стойкость режущего инструмента, мин.; $С_{ри}$ – стоимость единицы режущего инструмента; $С_{пр}$ – стоимость одного установочно-зажимного приспособления; $С_{заг}$ – стоимость одной заготовки; $С_{нч}$ – стоимость нормо-часа производственного рабочего; $T_{пар}$ – время обработки партии деталей, мин.

Блок 3. Определение погрешности обработки. Суммарная погрешность обработки определяется по следующим формулам [23]:

$$\Delta_{\Sigma} = f\left(\Delta_{у}; \varepsilon; \Delta_{и}; \Delta_{н}; \Delta_{по}; \Delta_{l}\right); \quad (15)$$

$$\Delta_{y} = y_{\max} - y_{\min} = W_{\max} \cdot P_{y\max} - W_{\min} \cdot P_{y\min}; \quad (16)$$

$$\Delta_{y} = W \cdot (P_{y\max} - P_{y\min}); \quad (17)$$

$$\Delta_{и} = \frac{L}{1000} \cdot u_0; \quad (18)$$

$$\Delta_{н} = K \cdot \sqrt{\Delta_{и.эт}^2 + \Delta_{у.эт}^2 + \Delta_{у.ин}^2}; \quad (19)$$

$$\varepsilon = \sqrt{(\varepsilon)_{б}^2 + (\varepsilon)_{з}^2 + (\varepsilon)_{п}^2}; \quad (20)$$

$$\Delta_{l} = C \cdot \frac{L_{инстр}}{F} \cdot \sigma \cdot \left(s \cdot t\right)^{0,75} \cdot V^{0,5}, \quad (21)$$

где Δ_{Σ} – суммарная погрешность обработки, мкм; $\Delta_{у}$ – погрешность, вызванная упругими деформациями технологической системы, мкм; ε – погрешность вызванная установкой заготовки, мкм; $\Delta_{и}$ – погрешность, вызванная размерным износом режущего инструмента, мкм; $\Delta_{н}$ – погрешность настройки режущего инструмента на размер, мкм; $\Delta_{по}$ – геометрическая погрешность обработки, мкм; Δ_{l} – погрешности, связанные с тепловыми деформациями технологической системы, мкм; $\varepsilon_{б}$ – погрешность базирования, мкм; $\varepsilon_{р}$ – погрешность закрепления, мкм; ε_{g} – погрешность, вызванная применением приспособления, мкм;

Блок 4. Определение значения целевой функции. Расчет значения целевой функции производится по формуле:

$$F_{тп} = \frac{T_i}{T_{\min}} k_T + \frac{\left(З_{пер}\right)_i}{\left(З_{пер}\right)_{\min}} k_З + \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\left(\Delta_{\Sigma}\right)_i}{\left(\Delta_{\Sigma}\right)_{\min}}\right) k_{\Delta}; \quad (22)$$

$$k_T + k_З + k_{\Delta} = 1; \quad (23)$$

T_i – срок изготовления партии деталей, изготавливаемой по i-ому варианту технологического процесса, час.; $T_{\min}$ – минимальный срок изготовления партии деталей, ч; $(З_{пер})_i$ – величина переменных затрат на изготовление партии деталей по i-му варианту технологического процесса; $(З_{пер})_{\min}$ – минимальная величина переменных затрат на изготовление партии деталей; $(\Delta_{\Sigma})_i$ – величина погрешности обработки для наиболее точного размера, обработанного по i-му варианту технологического процесса, мкм; $(\Delta_{\Sigma})_{\min}$ – минимальная величина погрешности обработки для наиболее точного размера, мкм; k_T, $k_З$, k_{Δ} – весовые коэффициенты.

Результаты имитационного моделирования

На основе разработанной имитационной модели была проведена технологическая подготовка производства на судоремонтном предприятии (г. Санкт-Петербург). Направления деятельности предприятия: ремонт и обслуживания судов, изготовление продукции по кооперации в условиях единичного и мелкосерийного производств. Были решены следующие задачи:

1. Произведен анализ производственной структуры предприятия, номенклатуры деталей, действующих технологических процессов;

2. Произведен сравнительный анализ данных полученных по результатам моделирова-

ния и фактических данных предприятия по результатам реализации действующих технологических процессов (для партий деталей, которые уже были изготовлены).

3. Произведено моделирование производственного процесса для номенклатуры деталей, планируемых для изготовления с учетом действующего производственного графика.

4. Для каждой партии деталей определен рациональный технологический маршрут обработки, необходимое количество и параметры режущего инструмента, величину теоретической погрешности обработки для наиболее точных размеров, длительность производственного цикла и рациональные режимы резания.

Результаты моделирования на примере 10 деталей представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Сравнительный анализ вариантов технологических процессов для изготовленной номенклатуры деталей

Comparative analysis of variants of technological processes for the manufactured nomenclature of parts

№ дет	Количество рассмотренных вариантов ТМО, шт.		Количество альтернативных вариантов для каждой единицы РИ, шт.		Погрешность обработки, %		Срок изготовления партии деталей, ч		Величина переменных затрат, тыс. руб.	
	ДП	ИМ	ДП	ИМ	ДП	ИМ	ДП	ИМ	ДП	ИМ
1	1	5	1	3–4	75	60	523	348	122,3	103,5
2	1	9	1	3–4	68	52	168	153	96,7	83,7
3	1	10	1	3–4	71	62	320	180	87,3	79,5
4	1	8	1	3–4	81	59	332	320	48,2	43,1
5	1	5	1	3–4	70	56	270	251	89,6	82,4

Наименование работ	ТПП по данным предприятия	ТПП на основе ИМ
Выбор рационального варианта ТМО и средств технологического оснащения на основе многокритериального анализа с учетом весовых коэффициентов.	Нет	Да
Определение допустимых значений режимов резания с учетом величины поля допуска наиболее точного размера.	Нет	Да

Таблица 2

Результаты имитационного моделирования для номенклатуры деталей, планируемой для изготовления

Results of simulation for the nomenclature of parts planned for manufacturing

№ дет	Количество рассмотренных вариантов ТМО, шт.	Количество альтернативных вариантов для каждой единицы РИ, шт.	Погрешность обработки, %	Срок изготовления партии деталей, ч	Величина переменных затрат, тыс. руб.
	ИМ	ИМ	ИМ	ИМ	ИМ
1	5	4	63	371	48,2
2	8	4	51	328	63,8
3	11	4	43	418	27,3
4	6	4	59	301	51,4
5	9	4	49	352	71,6

Наименование работ	ТПП на основе ИМ
Выбор рационального варианта ТМО и средств технологического оснащения на основе многокритериального анализа с учетом весовых коэффициентов.	Да
Определение допустимых значений режимов резания с учетом величины поля допуска наиболее точного размера.	Да

ДП – данные предприятия; ИМ – имитационное моделирование; ТМО – технологический маршрут обработки; РИ – режущий инструмент; ТПП – технологическая подготовка производства.

Выводы

Разработанная имитационная модель позволяет спроектировать и оценить множество вариантов технологических процессов обработки для партии деталей, произвести многокритериальный анализ и выбрать наилучшей вариант технологического процесса, производить контроль и оперативную коррекцию производственного процесса на основе моделирования множества производственных сценариев.

В качестве новизны можно выделить следующие элементы:

1. Сочетание элементов двух методов проектирования технологических процессов: групповой технологический процесс и модульный технологический процесс;

2. Рассмотрение множества альтернативных вариантов технологических маршрутов обработки и применяемых средств технологического оснащения;

3. Определение рациональных режимов резания на основе расчета суммарной погрешности обработки;

4. Контроль производственного процесса и оперативное внесение изменений в производственный график на основе имитационного моделирования множества производственных сценариев.

5. Определение значимости каждого параметра при выборе наилучшего варианта технологического процесса с помощью весовых коэффициентов.

Применение разработанной имитационной модели позволяет значительно снизить трудоемкость этапа технологической подготовки единичного и мелкосерийного, что приводит к повышению эффективности производственного процесса и снижению производственных затрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Lychagin D.V., Lasukov A.A., Walter A.V., Arkhipova D.A.** Systematic Classifier of Manufacturing Processes for Medium Size Shafts // Materials Science and Engineering. 2016. № 125. P. 2–6.

[2] **Baurina S.** The process of technological preparation of production in quality management system: characteristics and main stages. Economics of The Firm, 2013.

[3] **Rabinskiy L.N., Ripetskiy A., Zelenov S.V., Kuznetsova E.** Analysis and monitoring methods of technological preparation of the additive production // Journal of Industrial Pollution Control, 2017.

[4] **Svetlik Jo., Baron P., Dobránsky Jo., Kočiško M.** Implementation of Computer System for Support of Technological Preparation of Production for Technologies of Surface Processing // Applied Mechanics and Materials. 2014. 613. P. 418–425.

[5] **Burdo G.B.** Improving the technological preparations for manufacturing production // Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37. P. 49–56.

[6] **Zhilyaev A.S., Kugultinov S.D., Efremov S.M.** Automation of water distribution management during the reconstruction of main irrigation canals // Problems of ensuring accuracy in the manufacture of largesized thin-walled parts : OIP Conf. Series: Materials Science and Engineering (Krasnoyarsk, 4–6 April 2019). 2019. Vol. 537. P. 865–870.

[7] **Зяблов О.К., Фунтикова Е.В.** Автоматизация технологической подготовки судоремонтного производства // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2014. № 38. С. 49–53.

[8] **Сухарев В.В., Кузьмин А.А.** Алгоритм оптимальных решений в судоремонте с применением матрицы Крылова // Вестник государственного университета морского и речного транспорта имени адмирала С.О. Макарова. 2014. № 3(25). С. 81–89.

[9] **Зяблов О.К., Кочнев Ю.А.** Разработка системы автоматизированного проектирования технологических процессов ремонта судов внутреннее плавания // Речной транспорт (XXI век). 2017. № 2(82). С. 43–45.

[10] **Кузьмин А.А., Сахаров В.В.** Балансовые модели и их применение в автоматизированных системах управление производством // Журнал университета водных коммуникаций. 2013. № 1. С. 46–53

[11] **Турчанинова Т.В.** Совершенствование технического обслуживания и ремонта судов с использованием методов сетевого планирования и управления // Вестник МГТУ. 2011. № 14. С. 117–120.

[12] **Леонов А.А., Леонова Т.М.** Модель оптимизации ремонта судов по ремонтным базам // Вестник АГТУ. 2014. № 4. С. 62–68

[13] **Малыгин А.Н.** Модернизация предприятий судостроения и судоремонта на основе внедрения

автоматизированных информационных технологий // Juvenis Scientia. 2017. № 7. С. 26–29.

[14] **Бурмистров Е.Г., Михеев Т.А.** Проблемы внедрения автоматизированных систем управления проектами на судостроительных и судоремонтных предприятиях // Вестник ВГАВТ. 2017. № 52. С. 73–79

[15] **Moreno-Doru Res, Vasile Paul Bresfelean.** Means to Enhance the Performance of ERP Systems' Personalized Production Modules // Emerging Markets Queries in Finance and Business. 2014. No. 15. P. 262–270.

[16] **Farhang Akhavei, Arameh Khallaghi.** Friedrich Bleicher Development of a knowledge-based predictive model to estimate the welding process time in single part production systems // 5th CIRP Global Web Conference Research and Innovation for Future Production. 2016. No. 55. P. 212–217.

[17] **Petra Foith-Forster, Thomas Bauernhansl.** Changeable assembly systems through flexibly linked process modules // 48th CIRP Conference on Manufacturing systems. 2015. No. 41. P. 230–235.

[18] **Vivek R. Dave, Daniel A. Hartman, William H. King, Mark J. Cola, Rajendra U. Vaiday** Strategy for Small-Lot Manufacturimg // Los Alamos Science. 2003. No. 28. P. 63–67.

[19] **Базров Б.М.** Модульная технология в машиносстроении. М.: Машиностроение, 2001. 368 с.

[20] **Митрофанов С.П.** Групповая технология машиностроительного производства. В 2 т. Т. 1. Организация группового производства. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. 407 с.

[21] **Митрофанов С.П.** Групповая технология машиностроительного производства. В 2 т. Т. 2. Проектирование и использование технологической оснастки металлорежущих станков. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. 376 с.

[22] **Генкин Б.М.** Организация, нормирование и оплата труда на промышленных предприятиях. М.: Норма, 2003. 400 с.

[23] Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1 / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова. 5-е изд., испр. М.: Машиностроение-1, 2003. 912 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ХРУСТАЛЕВА Ирина Николаевна – *старший преподаватель Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*
E-mail: irina.khrustaleva@mail.ru

ЛЮБОМУДРОВ Сергей Александрович – *кандидат технических наук заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*
E-mail: lyubomudrow@yandex.ru

ЛАРИОНОВА Татьяна Анатольевна – *ассистент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*
E-mail: tsimkoshka@mail.ru

ТОЛСТОЛЕС Алексей Андреевич – *младший научный сотрудник Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*
E-mail: gmlaletol@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 04.09.2018

REFERENCES

[1] **D.V. Lychagin, A.A. Lasukov, A.V. Walter, D.A. Arkhipova,** Systematic Classifier of Manufacturing Processes for Medium Size Shafts, Materials Science and Engineering, 125 (2016) 2–6.

[2] **S. Baurina,** The process of technological preparation of production in quality management system: characteristics and main stages. Economics of The Firm, 2013.

[3] **L.N. Rabinskiy, A. Ripetskiy, S.V. Zelenov, E. Kuznetsova,** Analysis and monitoring methods of technological preparation of the additive production, Journal of Industrial Pollution Control, (2017).

[4] **Jo. Svetlik, P. Baron, Jo. Dobránsky, M. Kočiško,** Implementation of Computer System for Support of Technological Preparation of Production for Technologies of Surface Processing, Applied Mechanics and Materials, 613 (2014) 418–425.

[5] **G.B. Burdo,** Improving the technological preparations for manufacturing production, Russian Engineering Research, 37 (2017) 49–56.

[6] **A.S. Zhilyaev, S.D. Kugultinov, S.M. Efremov.** Automation of water distribution management during the reconstruction of main irrigation canals, Problems of ensuring accuracy in the manufacture of largesized thin-walled parts: OIP Conf. Series: Materials Science and Engineering (Krasnoyarsk, 4–6 April 2019), 537 (2019) 865–870.

[7] **O.K. Zyablov, Ye.V. Funtikova,** Avtomatizatsiya tekhnologicheskoy podgotovki sudoremontnogo proizvodstva, Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta, 38 (2014) 49–53.

[8] **V.V. Sukharev, A.A. Kuzmin,** Algoritm optimalnykh resheniy v sudoremonte s primeneniyem matritsy Krylova, Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo transporta imeni admirala S.O. Makarova, 3 (25) (2014) 81–89.

[9] **O.K. Zyablov, Yu.A. Kochnev,** Razrabotka sistemy avtomatizirovannogo proyektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov remonta sudov vnutrenneye plavaniya, Rechnoy transport (XXI vek), 2 (82) (2017) 43–45.

[10] **A.A. Kuzmin, V.V. Sakharov,** Balansovyye modeli i ikh primeneniye v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniye proizvodstvom, Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy, 1 (2013) 46–53.

[11] **T.V. Turchaninova,** Sovershenstvovaniye tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta sudov s ispolzovaniyem metodov setevogo planirovaniya i upravleniya, Vestnik MGTU, 14 (2011) 117–120.

[12] **A.A. Leonov, T.M. Leonova.** Model optimizatsii remonta sudov po remontnym bazam, Vestnik AGTU, 4 (2014) 62–68.

[13] **A.N. Malygin,** Modernizatsiya predpriyatiy sudostroyeniya i sudoremonta na osnove vnedreniya avtomatizirovannykh informatsionnykh tekhnologiy, Juvenis Scientia, 7 (2017) 26–29.

[14] **Ye.G. Burmistrov, T.A. Mikheyev,** Problemy vnedreniya avtomatizirovannykh sistem upravleniya proyektami na sudostroitelnykh i sudoremontnykh predpriyatiyakh, Vestnik VGAVT, 52 (2017) 73–79.

[15] **Moreno-Doru Res, Vasile Paul Bresfelean.** Means to Enhance the Performance of ERP Systems' Personalized Production Modules, Emerging Markets Queries in Finance and Business, 15 (2014) 262–270.

[16] **Farhang Akhavei, Arameh Khallaghi, Friedrich Bleicher,** Development of a knowledge-based predictive model to estimate the welding process time in single part production systems, 5th CIRP Global Web Conference Research and Innovation for Future Production, 55 (2016) 212–217.

[17] **Petra Foith-Forster, Thomas Bauernhansl,** Changeable assembly systems through flexibly linked process modules, 48th CIRP Conference on Manufacturing systems, 41 (2015) 230–235.

[18] Vivek R. Dave, Daniel A. Hartman, William H. King, Mark J. Cola, Rajendra U. Vaiday Strategy for Small-Lot Manufacturimg, Los Alamos Science. – 2003. №28 – 63–67 pp.

[19] **B.M. Bazrov,** Modulnaya tekhnologiya v mashinosstroyenii. M.: Mashinostroyeniye, 2001.

[20] **S.P. Mitrofanov,** Gruppovaya tekhnologiya mashinostroitelnogo proizvodstva. V 2 t. T. 1. Organizatsiya gruppovogo proizvodstva. 3-ye izd., pererab. i dop. L.: Mashinostroyeniye, Leningr. otd-niye, 1983.

[21] **S.P. Mitrofanov,** Gruppovaya tekhnologiya mashinostroitelnogo proizvodstva. V 2 t. T. 2. Proyektirovaniye i ispolzovaniye tekhnologicheskoy osnastki metallorezhushchikh stankov. 3-ye izd., pererab. i dop. L.: Mashinostroyeniye, Leningr. otd-niye, 1983.

[22] **B.M. Genkin,** Organizatsiya, normirovaniye i oplata truda na promyshlennykh predpriyatiyakh. M.: Norma, 2003.

[23] Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya. V 2 t. T. 1. Pod red. A.M. Dalskogo, A.G. Kosilovoy, R.K. Meshcheryakova, A.G. Sulova. 5-ye izd., ispravl. M.: Mashinostroyeniye-1, 2003.

THE AUTHORS

KHRUSTALEVA Irina N. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*
E-mail: irina.khrustaleva@mail.ru
LYUBOMUDROW Sergeii A. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*
E-mail: lyubomudrow@yandex.ru
LARIONOVA Tatiiana A. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*
E-mail: tsimkoshka@mail.ru
TOLSTOLES Alekseii A. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*
E-mail: gmlaletol@gmail.com

Received: 04.09.2018

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019

DOI: 10.18721/JEST.25307
УДК 621.512.0032

С.С. Бусаров, И.П. Аистов, Д.С. Титов

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ДЕФОРМАЦИЙ СТЕНОК ЦИЛИНДРА ТИХОХОДНЫХ ДЛИННОХОДОВЫХ БЕССМАЗОЧНЫХ ПОРШНЕВЫХ АГРЕГАТОВ

Результаты проведённых экспериментальных исследований деформированного состояния длинноходовой тихоходной ступени поршневого компрессорного агрегата позволили верифицировать методику расчёта для рассмотренного конструктивного исполнения ступени с учётом влияния изменяющихся параметров состояния газа в рабочей камере и температуры стенок. Описан разработанный экспериментальный стенд и методика исследования. Модель деформированного состояния цилиндра реализована с использованием программного комплекса ANSYS Workbench Mechanical (ПК ANSYS WM). Полученные данные по деформациям позволили дополнить существующую методику расчёта рабочих процессов тихоходных длинноходовых поршневых ступеней функцией изменения зазора в цилиндропоршневом уплотнении. Данный вопрос является весьма актуальным для процессов в тихоходных агрегатах, поскольку явление релаксации напряжений в стенках цилиндра значительно отличается от процессов, происходящих в быстроходных поршневых ступенях.

Ключевые слова: длинноходовой поршневой агрегат, деформация цилиндра, условный зазор, тензометрирование, тепловой расчёт.

Ссылка при цитировании:
Бусаров С.С., Аистов И.П., Титов Д.С. Верификация методики расчёта деформаций стенок цилиндра тихоходных длинноходовых бессмазочных поршневых агрегатов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 3. С. 97–107. DOI: 10.18721/JEST.25307

S.S. Busarov, I.P. Aistov, D.S. Titov

Omsk state technical university, Omsk, Russia

VERIFICATION OF METHOD FOR CALCULATING DEFORMATIONS OF CYLINDER WALLS OF LOW-SPEED LONG-STROKE OIL-FREE PISTON UNITS

The results of experimental studies of deformed state of a long-stroke low-speed stage of a piston compressor unit made it possible to verify the calculation method for the given design stage, taking into account the influence of changing gas state parameters in the working chamber and wall temperature. The developed experimental testbed and research methodology are described. The model of the deformed state of the cylinder is implemented using the ANSYS Workbench Mechanical software package (ANSYS WM software package). The obtained data on deformations made it possible to supplement the existing method of calculating the working processes of low-speed long stroke piston stages with the function of changing the gap in the cylinder-piston seal. This issue is very relevant for processes in low-speed units, since the phenomenon of stress relaxation in cylinder walls is significantly different from the processes occurring in high-speed piston stages.

Keywords: long stroke piston unit, cylinder deformation, conditional clearance, strain gauging, thermal calculation.

Citation:
S.S Busarov, I.P. Aistov, D.S. Titov, Verification of method for calculating deformations of cylinder walls of low-speed long-stroke oil-free piston units, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 25 (03) (2019) 97–107. DOI: 10.18721/JEST.25307

Введение. Деформации цилиндра поршневого компрессорного агрегата, обусловленные как избыточным давлением рабочей среды в камере сжатия и его температурным состоянием, будут тем больше, чем больше будет избыточное давление и температура. Причём перемещение поршня в рабочей камере будет постоянно сдвигать область избыточного давления в процессе сжатия, то есть на цилиндре будет образована движущаяся и постоянно растущая волна – цилиндр будет «дышать». В процессе всасывания избыточное давление будет практически отсутствовать и, следовательно, деформации цилиндра, обусловленные только его тепловым состоянием будут минимальны. Как показали теоретические исследования, температурное состояние цилиндра играет решающую роль в возникающих значениях деформаций [1, 2, 13, 14]. Деформированное состояние цилиндрической части будет способствовать росту утечек из рабочей камеры. Естественно данные процессы скажутся на эффективности рабочего процесса тихоходных длинноходовых агрегатов.

Как было показано в ранее проведённых работах, тихоходные длинноходовые ступени поршневых компрессоров имеют свою конструктивную особенность, которая по сравнению с быстроходными агрегатами уменьшает их жёткость, а именно это показатель $\psi = S/d_ц$ (S – ход поршня, м; $d_ц$ – диаметр цилиндра, м), который имеет значение 5...20 [3, 4]. К тому же, режим работы длинноходовых агрегатов (длительное время цикла: период полного хода поршня – 2...6 с) способствует тому, что деформации могут достигать своего максимального значения [5].

Данные факторы определили необходимость уточнения существующей методики расчёта рабочих процессов тихоходных длинноходовых агрегатов [6–8] в плане учёта деформированного состояния цилиндрической части рабочей камеры и определения возникающих зазоров как функции давления, температуры и координаты рассматириваемой точкию.

Объект исследования

Объектом исследования являются тихоходная ступеньпоршневого компрессорного агрегатасо следующими параметрами: геометрические – внутренний диаметр цилиндра $d_ц$ = 0,05 м; ход поршня S = 0,5 м; толщина стенки цилиндра δ = 0,0025 м; радиус наружного цилиндра R = 0,0275 м; граничные условия – температура газа на всасывании – 290...295 °K, давление всасывания – 0,1 МПа, давление нагнетания $p_н$ – до 10 МПа; температура охлаждающей среды – 291 °K, физические условия: сжимаемый газ – воздух, охлаждение ступени – естественные условия в лаборатории. Уплотнение цилиндропоршневой пары тихозодной ступени – манжетное (материал – Флубон 20).

Общий вид тихоходной длинноходовой ступени представлен на рис. 1.

Методика исследования

Экспериментальные исследования. Цель экспериментальных исследований – определение радиальных перемещений (деформаций) цилиндра в зависимости от давления нагнетания и температуры стенок цилиндра и координаты положения поршня. Радиальные перемещения стенок цилиндра приводят к образованию зазоров между стенками цилиндра и поршнем и увелечению утечек через цилиндропоршневое упплотнение [7, 11, 12, 15].

Экспериментальные исследования по измерению деформированного состояния цилиндра длинноходового агрегата проводились на стенде, схема и фотография которого представлены на рис. 2.

Данный эксперимент направлен на определение деформаций цилиндра как функции давления в зоне нагнетания и температуры стенок цилиндра.

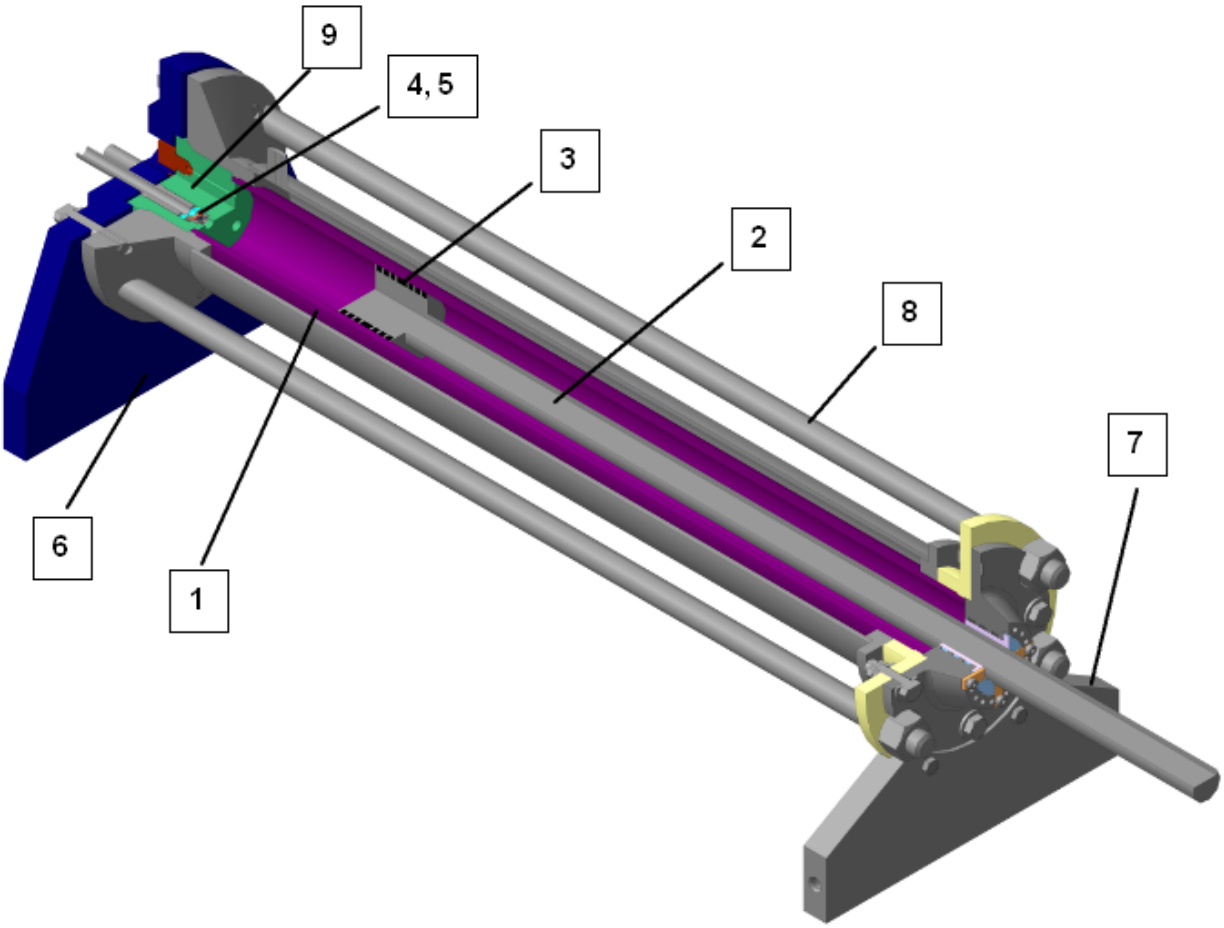


Рис. 1. Общий вид тихоходной длинноходовой ступени поршневого агрегата:
1 – цилиндр; 2 – поршень-шток; 3 – поршневые уплотнения; 4,5 – всасывающий и нагнетательный клапаны; 6,7 – опоры; 8 – шпильки; 9 – клапанная группа

Fig. 1. General view of the low-speed long stroke piston stage:
1 – cylinder; 2 – piston rod; 3 – piston seals; 4, 5 – suction and discharge valves; 6, 7 – supports; 8 – studs; 9 – valve group

В процессе работы длинноходового агрегата под действием давления и изменяющихся температур в стенке цилиндра возникает двухосное напряженное состояние: кольцевые напряжения в осевых сечениях и продольные напряжения в поперечных сечениях цилиндрической оболочки. Измерение деформаций и напряжений в стенке цилиндра компрессора выполнялось методом тензометрирования [6]. В ходе испытаний с помощью тензодатчиков возможно непрерывно контролировать деформации и напряжения по двум взаимно перпендикулярным направлениям на поверхности цилиндра компрессора.

Проблема повышения точности измерения деформаций возникает из-за постоянно изменяющихся условий нагружения элементов компрессора. В связи с этим была разработана многоканальная тензостанция, способная отражать динамику измеряемых процессов. На рис. 3 показана схема измерения и регистрации деформаций на поверхности цилиндра компрессора [8].

Для измерения деформаций цилиндра используются поверхностные тензорезисторы, позволяющие с высокой точностью определять деформации по изменению собственного сопротивления при растяжении и сжатии [7, 9].

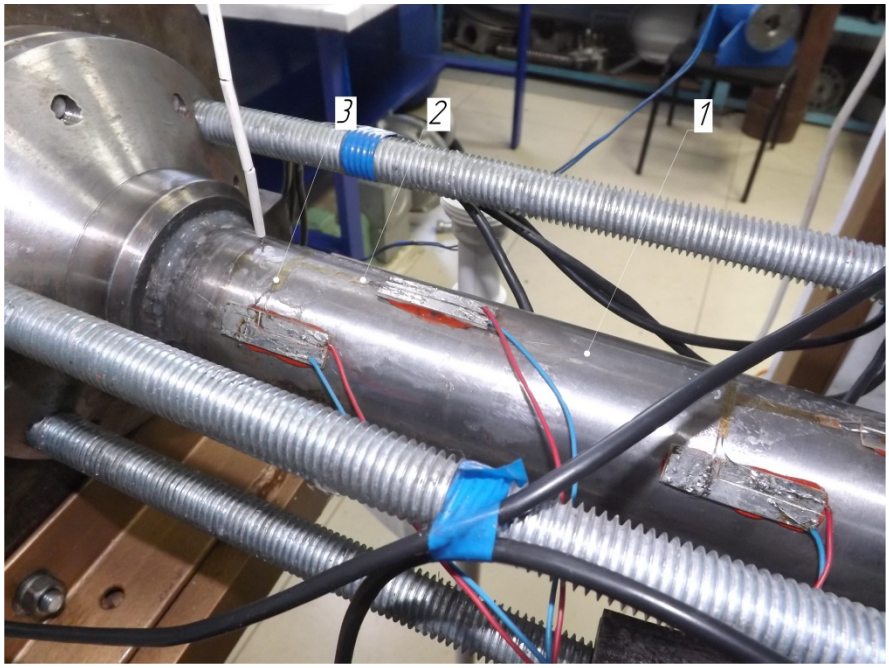


Рис. 2. Экспериментальный стенд определения деформаций цилиндра поршневого агрегата:
1 – цилиндр; 2 – тензодатчик для измерения продольных деформаций;
3 –тензодатчик для измерения кольцевых деформаций

Fig. 2. Experimental stand for determining the deformations of the cylinder of a piston unit:
1 – a cylinder; 2 – strain gauge for measuring longitudinal deformations; 3 – strain gage for measuring ring deformations

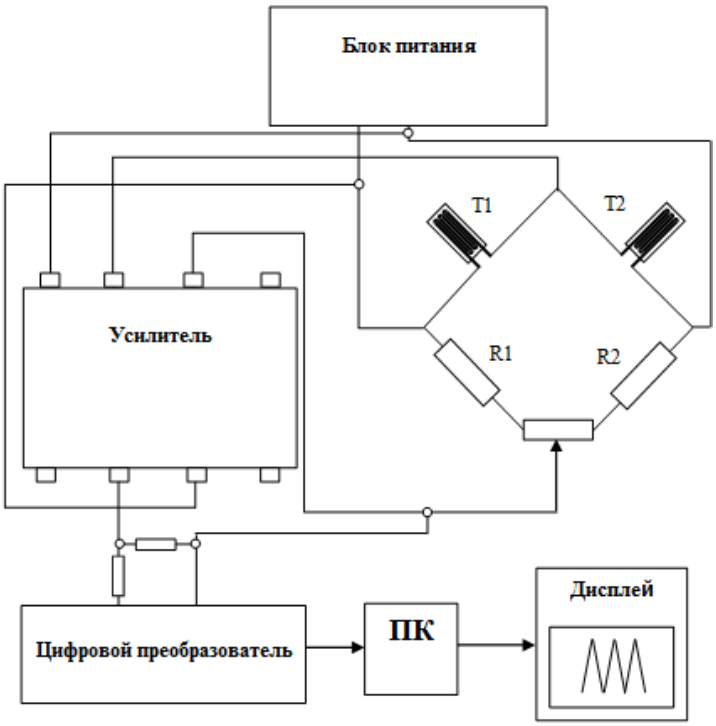


Рис. 3. Мостовая схема тензостанции измерения и регистрации деформаций цилиндра
Fig. 3. Bridge diagram of the strain gauge measuring and recording cylinder deformations

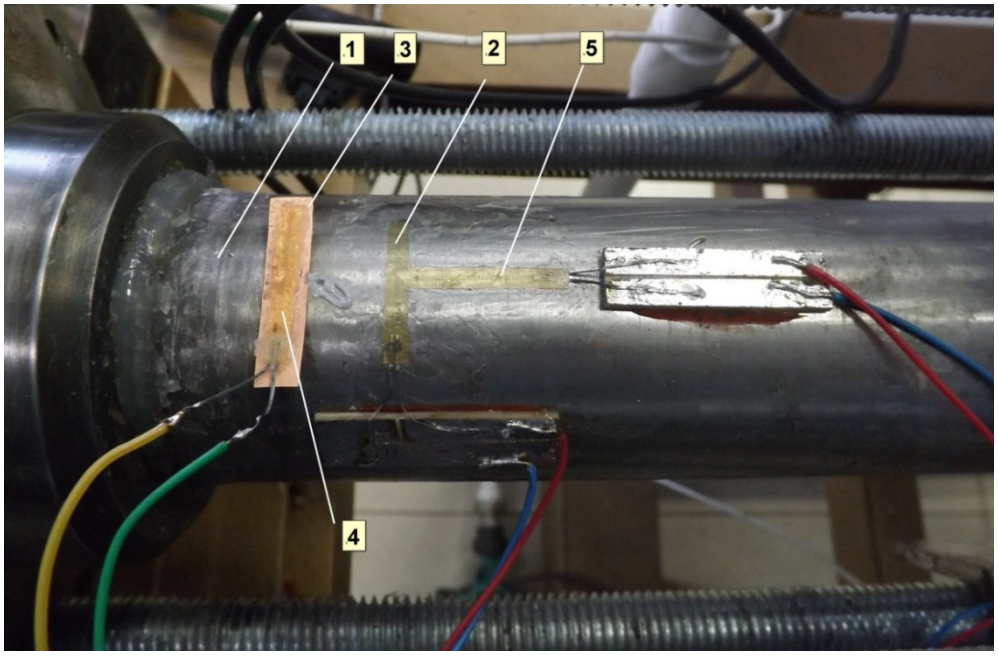


Рис. 4. Схема наклейки тензорезисторов на цилиндре
Fig. 4. The scheme of stickers of strain gauges on the cylinder

Для регистрации деформаций, по верхней образующей цилиндра компрессора были выбраны несколько точек, в которых попарно наклеивались тензорезисторы в окружном и продольном направлениях (рис. 4). Такое расположение тензорезисторов совпадает с направлением главных напряжений. Для каждого тензорезистора выделен отдельный канал мостовой схемы (рис. 3), на которой тензорезистор отмечен как Т1. Измерение деформаций проводилось независимо по взаимно перпендикулярным направлениям путем подключения тензорезисторов в мостовую схему. Второй тензорезистор Т2, входящий в мостовую схему, компенсирует влияние окружающей температуры на выходной сигнал, а также, используется для тарировки.

Тарировка тензодатчиков предварительно проводилось с помощью тарировочной балки. Для этого, тензорезистор Т2 наклеивался на балку, изготовленную из того же металла, что и цилиндр тихоходной ступени. Балка нагружалась чистым изгибом, и ее деформации были пропорциональны прогибу, который измерялся с помощью стрелочного индикатора с точностью до 0,01 мм.

Известная величина прогиба (деформации) тарировочной балки сопоставлялась с величиной выходного напряжения при разбалансировке моста из-за изменения сопротивления тензодатчика Т2. Аналоговый сигнал с выхода тензостанции подавался на входцифрового преобразователя, сигнал которого может быть обработан на персональном компьютере [8].

Проводился эксперимент на тихоходной ступени компрессора без охлаждения. На цилиндрической части (рис. 2, цилиндр – поз. 1) установлены 5 тензодатчиков (поз 2),трииз которых, с координатами (считая от клапанной группы) 30 мм, 170, 390 мм, измеряют радиальные деформации, и, дватензодатчика (поз. 3), с координатами 45 и 185 мм измеряют продольные деформации. Сигналы с тензодатчиков поступают на преобразователь напряжения измерительный (Е14-140-М) и далее величина изменения деформаций стенок в кольцевом (по окружности цилиндра) и продольном (вдоль оси цилиндра) направлениях обрабатывались с помощью пакета программы PowerGraph 3.3 и выводились на монитор персонального компьютера поз. 5 и (рис. 5).

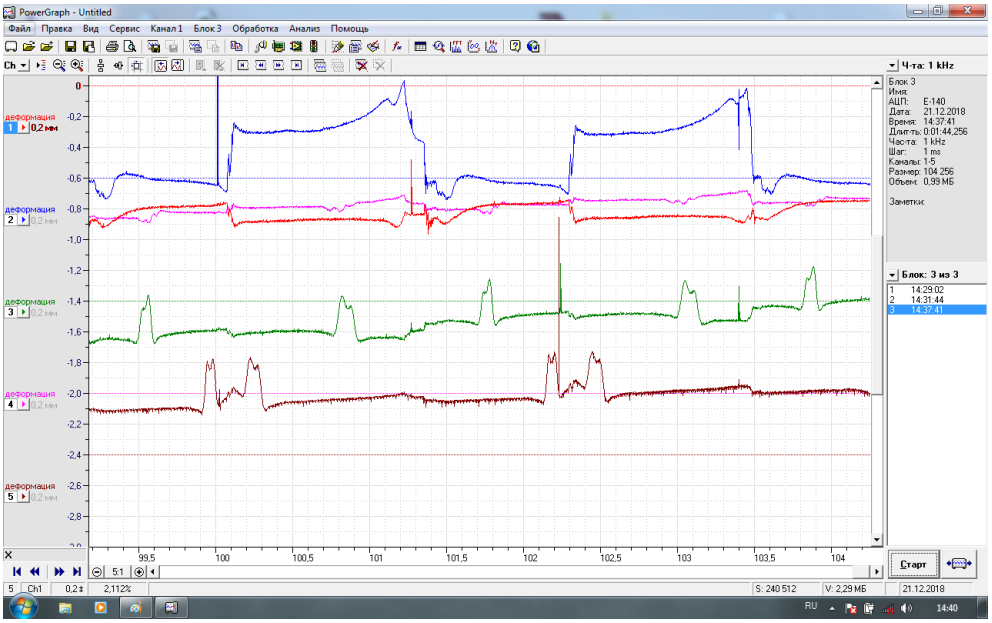


Рис. 5. Вид экспериментальных данных в программе PowerGrsph 3.3
Fig. 5. Type of experimental data in the program PowerGrsph 3.3

Эксперимент проводился следующим образом. Ступень выводилась на режим работы с постоянным давлением нагнетания. Затем, с помощью тензостанции, на персональный компьютер записывались показания с тензодатчиков в конечном положении поршня в момент действия максимального рабочего давления в зоне всасывания исследуемой ступени. В районе установки тензодатчиков на поверхности цилиндра были установлены термопары для определения температуры стенки цилиндра.

Расчетная методика определения радиальных перемещений стенок цилиндра

Для определения перемещения цилиндра в радиальном направлении ΔR при известной деформации стенки цилиндра в кольцевом направлении ΔS_0 (рис. 7) можно использовать положения теории тонкостенных оболочек [9].

Деформация стенки цилиндра в кольцевом направлении вследствие приращения цилиндра ΔR радиусом R определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{dS_1 - dS_0}{dS_0}, \qquad (1)$$

где dS_0 – длина элементарного кольцевого отрезка до деформации цилиндра; dS_1 – длина элементарного кольцевого отрезка после деформации цилиндра, величина которых может быть определена (см. рис. 6):

$$dS_0 = R \cdot d\varphi, \quad dS_1 = \left(R + \Delta R\right) \cdot d\varphi. \qquad (2)$$

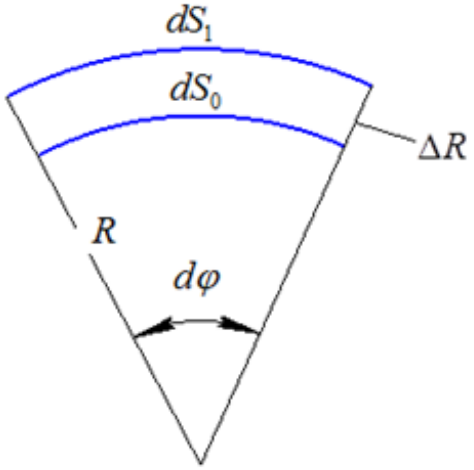


Рис. 6. Схема определения кольцевых деформаций стенок цилиндра

Fig. 6. Scheme for determining the annular deformations of the cylinder walls

Следовательно

$$\varepsilon = \frac{dS_1 - dS_0}{dS_0} = \frac{Rd\varphi + \Delta Rd\varphi - Rd\varphi}{Rd\varphi} = \frac{\Delta R}{R}.$$

Таким образом, перемещение стенки цилиндра в радиальном направлении ΔR через деформацию стенки цилиндра в кольцевом направлении ε можно определить как

$$\Delta R = \varepsilon \cdot R. \quad (3)$$

Величину кольцевых деформаций стенки цилиндра $\varepsilon^{эксп}$ можно получить методом тензометрирования, по методике описанной выше.

Математическая модель оценки деформированного состояния стенок цилиндра поршневого агрегата

Рассмотрим математическую модель оценки напряженно-деформированного состояния стенок цилиндра поршневого агрегата с целью определения радиальных перемещений стенки цилиндра. Расчетнаямодель построена на основе программного комплекса ANSYS Workbench Mechanical (ПК ANSYS WM) [1, 2, 10]. Данная программа позволяет учитывать необходимые условия нагружения стенок цилиндра поршневого агрегата, реализуемые при проведении эксперимента, а именно: давление в зоне нагнетания и температура стенки цилиндра агрегата, которые фиксировались в ходе эксперимента (см. таблицу).

Расчетная модель упрощена по сравнению с реальной конструкцией стенда. Основными элементами деформируемой модели тихоходной ступени поршневого агрегата являются: тонкостенная цилиндрическая оболочка, две опоры, поршень с уплотнительными кольцами. На рис. 7, в качестве иллюстрации, приведена сетка конечных элементов цилиндра поршневого агрегата. Сетка конечных элементов генерировалась в процедуре MeshSizing автоматически стандартными средствами ПК ANSYS WM по заданным пользователем параметрам конечного элемента: тип элемента – 10-узловой тетраэдр; размер ребра тетраэдра варьировался от 0,5 до 2 мм.

Соединения и взаимодействие между отдельными деталями моделировались путем назначения контактов между ними (Connections – Contacts). В зоне нагнетания и всасывания, соединение торцов цилиндра моделировалась с опорной пластиной путем задания неразрывного контакта на границе соединения тел – Bonded – Solid To Solid. Подвижный контакт между стенкой внутренней стенкой цилиндра и уплотнением поршня агрегата задан граничным условием Frictional (коэффициент трения $f = 0{,}2$). В расчетной модели жесткость опор не учитывалась, а их защемление моделировалась командой FixedSupport.

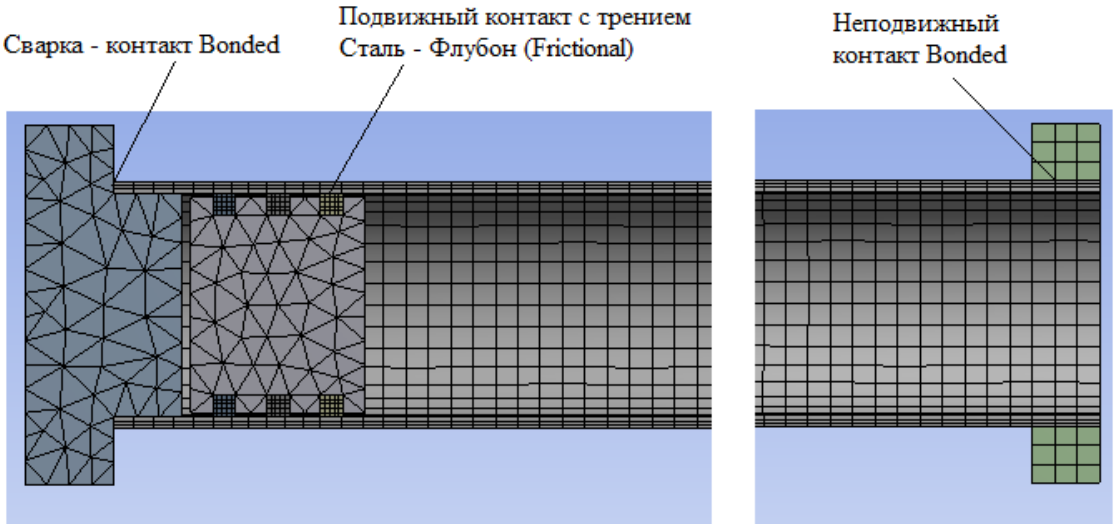


Рис. 7. Сетка конечных элементов для моделирования поршневого агрегата в ПК ANSYS WM
Fig. 7. Finite Element Grid for Piston Assembly Simulation in ANSYS WM

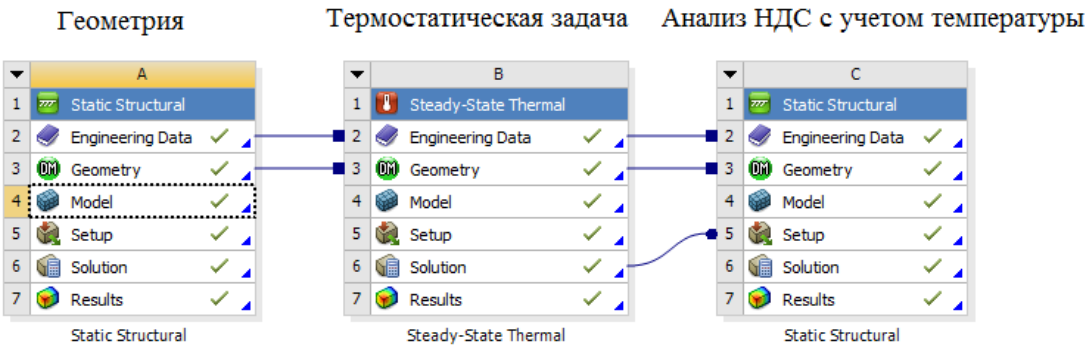


Рис. 8. Схема проекта расчетной модели расчета температуры и оценки напряженно-деформированного состояния стенок цилиндра поршневого агрегата

Fig. 8. Scheme of the draft computational model for calculating the temperature and estimating the stress-strain state of the cylinder walls of a piston unit

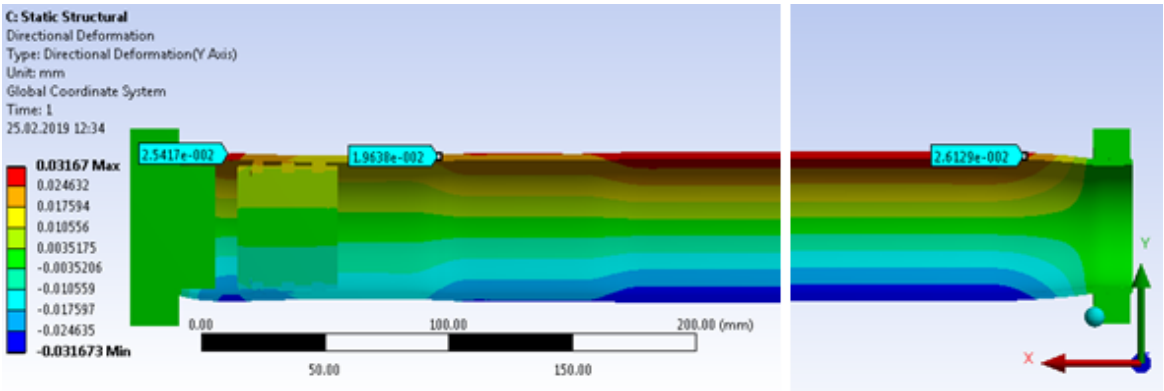


Рис. 9. Радиальные перемещения стенок цилиндра поршневого агрегата

Fig. 9. Radial movement of the cylinder walls of the piston unit

Для учета влияния температуры стенок цилиндра, полученных в ходе эксперимента с помощью термопар, на величину их деформаций в расчетной модели предусмотрено предварительное решение в пакете ПК ANSYS WM термостатической задачи при помощи стандартного модуля Steady-State Thermal (рис. 8).

Полученное распределение температур стенок цилиндра передается в модуль StaticStructural ПК ANSYS WM для оценки напряженно-деформированного состояния стенок цилиндра поршневого агрегата, в том числе, определение радиальных перемещений стенок цилиндра $\Delta R^{расч}$ в точках расположения тензорезисторов (рис. 9).

Результаты

Верификация методики расчёта деформаций стенок цилиндра производилась следующим образом:

1) Определяем величину кольцевых деформаций стенки цилиндра $\varepsilon^{эксп}$ методом тензометрирования в точках расположения тензорезисторов. При этом фиксируются значения давления в зоне нагнетания и температура стенки в точках расположения тензорезисторов (см. таблицу).

2) Согласно представленной математической модели в ПК ANSYS WM, определяем величину радиальных перемещений стенок цилиндра $\Delta R^{расч}$ в точках расположения тензорезисторов.

Экспериментальные данные и расчетные значения величин радиальных перемещений стенки цилиндра поршневого агрегата

Experimental data and calculated values of the values of the radial displacements of the cylinder wall of a piston unit

№ п/п	Давление нагнетания, МПа	Номер тензо-резистора	Координата тензо-резистора, мм	Температура стенки цилиндра, °С	Радиальные перемещения стенки цилиндра $\Delta R^{эксп}$, мм	Радиальные перемещения стенки цилиндра $\Delta R^{расч}$, мм
1	8,9	Т1	30	30	0,00495	0,00491
2	8,9	Т4	170	60	0,0148	0,0156
3	8,9	Т5	390	65	0,0129	0,0148
4	7,8	Т1	30	35	0,0165	0,0163
5	7,8	Т4	170	45	0,0088	0,0093
6	7,8	Т5	390	35	0,0088	0,0095

3) Для сравнения экспериментальных данных и расчетных значений, по формуле (3) определяем величину радиальных перемещений $\Delta R^{эксп}$. Радиус наружного цилиндра поршня агрегата с учетом его толщины принимался равным $R = 27{,}5$ мм.

В таблице приведены экспериментальные данные и расчетные значения величин радиальных перемещений стенки цилиндра поршневого агрегата.

Полученная погрешность методики не превышает 15 %, что вполне можно считать удовлетворительным результатом для данных исследователей.

Выводы

В работе представлена верифицированная методика расчёта деформированного состояния цилиндра тихоходного длинноходового агрегата с целью определения радиальных перемещений цилиндра при действии рабочего давления в полости нагнетания и с учетом температуры стенки цилиндра, что позволяет оценить образующиеся зазоры в цилиндропоршневой паре. Значения полученных зазоров при деформированном состоянии могут быть введены в методику расчёта рабочих процессов тихоходных длинноходовых ступеней поршневых агрегатов. Кроме того, предложенная методика может быть в дальнейшем применена при проведении проектных расчётов, параметрического анализа и моделировании различных конструктивных схем, тихоходных длинноходовых ступеней поршневых агрегатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Aistov I.P., Vansovich K.A., Busarov S.S., Titov D.S.** Evaluation of Stress-Strain State of the Slow-Speed Compressor Cylinder // Oil and Gas Engineering (OGE-2018): AIP Conf. Proc. 2007. 030064-1–030064-7.

[2] **Бусаров С.С., Аистов И.П., Вансович К.А., Титов Д.С.** Оценка напряженно-деформированного состояния цилиндра тихоходного компрессора // Компрессорная техника и пневматика. 2018. № 4. С. 7–11.

[3] **Бусаров С.С., Юша В.Л., Недовенчаный А.В, Громов А.Ю.** Анализ температурного состояния интенсивно охлаждаемой длинноходовой тихоходной ступени поршневого компрессора // Низкотемпературные и пищевые технологии в XX веке: матер. VII Междунар. науч.-техн. конф. СПб.: Ун-т ИТМО, 2015. С. 66–69.

[4] **Yusha V.L., Busarov S.S., Gromov A.Yu.** Assessment of the Prospects of Development of Medium-Pressure Single-Stage Piston Compressor Units // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. No. 53(7–8). URL: https://doi.org/10.1007/s10556-017-0362-2

[5] **Юша В.Л., Недовенчаный А.В., Бусаров С.С.** Экспериментальная оценка эффективности рабо-

чих процессов тихоходных длинноходовых поршневых компрессорных ступеней при сжатии различных газов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2018. № 8. С. 27–29.

[6] Тензометрия в транспортном машиностроении / А.Н. Серьезнов [и др.]. Новосибирск: Наука, 2014. 272 с.

[7] **Бусаров С.С., Титов Д.С., Дёмин И.С., Недовенчаный А.В.** Оценка влияния неплотностей цилиндропоршневых уплотнений на рабочий процесс тихоходных длинноходовых поршневых агрегатов // Омский научный вестник. 2019. № 1 (163). С. 5–10. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-163-5-10.

[8] **Бусаров, С.С., Аистов И.П., Вансович К.А., Титов Д.С., Гошля Р.Ю.** Экспериментальное определение деформаций цилиндра тихоходных длинноходовых бессмазочных поршневых агрегатов // Компрессорная техника и пневматика. 2019. № 1. С. 20–23.

[9] **Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С.** Пластинки и оболочки. М.: Либроком, 2009. 640 с.

[10] **Madenci E., Guven I.** The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS. DOI 10.1007/978-1-4899-7550-8

[11] **Громов А.Ю.** Разработка поршневых ступеней с линейным приводом для малорасходных компрессорных агрегатов и исследование их рабочих процессов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2017. 18 с.

[12] **Пластинин П.И.** Расчет и исследование поршневых компрессоров с использованием ЭМВ // Итоги науки и техники. Сер. Насосостроение и компрессоростроение. Т. 2. М., 1981. 168 с.

[13] **Френкель М.И.** Поршневые компрессоры. Теория, конструкции и основы проектирования. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1969. 744 с.

[14] **Plastinin P., Fedorenko S.** Simulation of Transient Gas-Temperatures in Cylinders of Reciprocating Compressors Using Identification Techniques With a Mathematical Model // International Compressor Engineering Conference. 1978. Paper 295. URL: http://docs.lib.purdue.edu/icec/295

[15] **Chrustalev B.S., Zdalinsky V.B., Bulanov V.P.A.** Mathematical Model of Reciprocating Compressor With One or Several Stages for the Real Gases // International Compressor Engineering Conference. 1996/ Paper 1108. URL: http://docs.lib.purdue.edu/icec/1108

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БУСАРОВ Сергей Сергеевич – *доцент Омского государственного технического университета кандидат технических наук*
E-mail: bssi1980@mail.ru
АИСТОВ Игорь Петрович – *профессор Омского государственного технического университета доктор технических наук*
E-mail: aistov_i@mail.ru
ТИТОВ Даниил Сергеевич – *ассистент Омского государственного технического университета*
E-mail: xltitov@rambler.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 28.05.2019

REFERENCES

[1] **I.P. Aistov, K.A. Vansovich, S.S. Busarov, D.S. Titov,** Evaluation of Stress-Strain State of the Slow-Speed Compressor Cylinder, Oil and Gas Engineering (OGE-2018): AIP Conf. Proc., (2007) 030064-1–030064-7.

[2] **S.S. Busarov, I.P. Aistov, K.A. Vansovich, D.S. Titov,** Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya tsilindra tikhokhodnogo kompressora, Kompressornaya tekhnika i pnevmatika, 4 (2018) 7–11.

[3] **S.S. Busarov, V.L. Yusha, A.V Nedovenchanyy, A.Yu. Gromov,** Analiz temperaturnogo sostoyaniya intensivno okhlazhdayemoy dlinnokhodovoy tikhokhodnoy stupeni porshnevogo kompressora, Nizkotemperaturnyye i pishchevyye tekhnologii v XX veke: mater. VII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. SPb.: Un-t ITMO, (2015) 66–69.

[4] **V.L. Yusha, S.S. Busarov, A.Yu. Gromov,** Assessment of the Prospects of Development of

Medium-Pressure Single-Stage Piston Compressor Units, Chemical and Petroleum Engineering, 53 (7–8) (2017). URL: https://doi.org/10.1007/s10556-017-0362-2

[5] **V.L. Yusha, A.V. Nedovenchanyy, S.S. Busarov,** Eksperimentalnaya otsenka effektivnosti rabochikh protsessov tikhokhodnykh dlinnokhodovykh porshnevykh kompressornykh stupeney pri szhatii razlichnykh gazov, Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye, 8 (2018) 27–29.

[6] Tenzometriya v transportnom mashinostroyenii. A.N. Seryeznov i dr. Novosibirsk: Nauka, 2014.

[7] **S.S. Busarov, D.S. Titov, I.S. Demin, A.V. Nedovenchanyy,** Otsenka vliyaniya neplotnostey tsilindroporshnevykh uplotneniy na rabochiy protsess tikhokhodnykh dlinnokhodovykh porshnevykh agregatov, Omskiy nauchnyy vestnik, 1 (163) (2019) 5–10. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-163-5-10

[8] **S.S. Busarov, I.P. Aistov, K.A. Vansovich, D.S. Titov, R.Yu. Goshlya,** Eksperimentalnoye opredeleniye deformatsiy tsilindra tikhokhodnykh dlinnokhodovykh bessmazochnykh porshnevykh agregatov, Kompressornaya tekhnika i pnevmatika, 1 (2019) 20–23.

[9] **S.P. Timoshenko, S. Voynovskiy-Kriger,** Plastinki i obolochki. M.: Librokom, 2009.

[10] **E. Madenci, I. Guven,** The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS. DOI 10.1007/978-1-4899-7550-8

[11] **A.Yu. Gromov,** Razrabotka porshnevykh stupeney s lineynym privodom dlya maloraskhodnykh kompressornykh agregatov i issledovaniye ikh rabochikh protsessov: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Omsk, 2017.

[12] **P.I. Plastinin,** Raschet i issledovaniye porshnevykh kompressorov s ispolzovaniyem EMV, Itogi nauki i tekhniki. Ser. Nasosostroyeniye i kompressorostroyeniye, 2 (1981).

[13] **M.I. Frenkel,** Porshnevyye kompressory. Teoriya, konstruktsii i osnovy proyektirovaniya. 3-ye izd., pererab. i dop. L.: Mashinostroyeniye, 1969.

[14] **P. Plastinin, S. Fedorenko,** Simulation of Transient Gas-Temperatures in Cylinders of Reciprocating Compressors Using Identification Techniques With a Mathematical Model, International Compressor Engineering Conference, Paper 295 (1978). URL: http://docs.lib.purdue.edu/icec/295

[15] **B.S. Chrustalev, V.B. Zdalinsky, V.P.A. Bulanov,** Mathematical Model of Reciprocating Compressor With One or Several Stages for the Real Gases, International Compressor Engineering Conference, Paper 1108 (1996). URL: http://docs.lib.purdue. edu/icec/1108.

THE AUTHORS

BUSAROV Sergeii S. – *Omsk State technical university*
E-mail: bssi1980@mail.ru
AISTOV Iror P. – *Omsk State technical university*
E-mail: aistov_i@mail.ru
TITOV Daniil S. – *Omsk State technical university*
E-mail: xltitov@rambler.ru

Received: 28.05.2019

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019

DOI: 10.18721/JEST.25308
УДК 621.874, 69.07

А.В. Наумов, К.П. Манжула

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕСТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ КОРОБЧАТЫХ БАЛОК С КРИВОЛИНЕЙНЫМИ СТЕНКАМИ

В работе проведено расчетно-экспериментальное исследование местной устойчивости элементов коробчатой балки с криволинейными стенками. Расчетом в среде Ansys показано, что критические напряжения местной устойчивости криволинейных стенок в коробчатых балках выше, чем прямых стенок. С увеличением кривизны стенок значение критических напряжений местной устойчивости растет нелинейно. По результатам численного эксперимента с варьированием геометрических параметров балки получены расчетные зависимости для оценки критических напряжений местной устойчивости. Для экспериментальной проверки полученных зависимостей разработана установка, позволяющая определять усилия, деформации и напряжения в местах потери местной устойчивости коробчатых балок. Сравнительным экспериментом и расчетом балок с криволинейными и прямыми стенками показано, что криволинейные стенки в коробчатых балках имеют более высокую, в 2,5–4 раза, устойчивость по критическим напряжениям, чем прямые стенки

Ключевые слова: коробчатая балка, криволинейные стенки, местная устойчивость, критические напряжения, МКЭ, эксперимент.

Ссылка при цитировании:
Наумов А.В., Манжула К.П. Расчетно-экспериментальное исследование местной устойчивости коробчатых балок с криволинейными стенками // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 3. С. 108–119. DOI: 10.18721/JEST.25308

A.V. Naumov, K.P. Manzhula

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

EXPERIMENTAL STUDY OF LOCAL BUCKLING OF BOX-SHAPED BEAMS WITH NON-LINEAR WALLS

Experimental analysis of buckling stress for box-shaped beams with non-linear walls was performed. Calculations in Ansys showed that the critical stresses of local buckling of beams with non-linear walls are higher than in beams with standard walls. The value of critical stresses of local buckling grows nonlinearly with increasing wall curvature. Dependences are obtained for estimating the critical stresses of local buckling based on the results of a numerical experiment with varying geometric parameters of the beam. For experimental verification of the obtained dependences, a test facility was developed. It allows determining the forces, deformations, and stresses in area where the local buckling of box-shaped beams is lost. A comparative experiment and calculation of beams with linear and non-linear walls showed that non-linear walls in box-shaped beams have a higher (by 2.5–4 times) critical stress value than standard linear walls.

Keywords: box-shaped beam, non-linear walls, local buckling, critical stress value, FEM, experimental analysis.

Citation:
A.V. Naumov, K.P. Manzhula, Experimental study of local buckling of box-shaped beams with non-linear walls, St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 25 (03) (2019) 108–119. DOI: 10.18721/JEST.25308

Введение. Несущими элементами конструкций транспортно-технологических машин, строительных сооружений, мостов являются балочные изделия, изготовленные прокатом или при помощи сварки. В типовых конструкциях невысокой нагруженности используют фасонный прокат, в более нагруженных и сложных конструкциях используют многоэлементные сварные балки. В таких балках помимо удовлетворения обязательным критериям прочности и жесткости должна обеспечиваться местная устойчивость поясов и стенок. Потеря местной устойчивости этих элементов приводит к потере локальной или общей несущей способности, или к аварийным ситуациям (рис. 1). Для повышения местной устойчивости стенки и пояса балок укрепляют продольными и поперечными ребрами жесткости, диафрагмами, расчет, конструирование и производство которых увеличивает трудозатраты, себестоимость изготовления и массу.

Одним из решений вышеуказанной проблемы являлся переход в 80-е годы XX столетия к гофробалкам (SIN-балкам) [1, 2] – балкам с гофрированными стенками, изготавливаемыми прокатом. Такие стенки особенно эффективны в двутавровых балках, а также в качестве стенок железнодорожных вагонов, транспортных контейнеров, мостов. Коробчатые балки наиболее распространены в машиностроительных конструкциях, так как обладают повышенной жесткостью в горизонтальной плоскости и могут изготавливаться сваркой требуемой формы из листового проката.

Попытки увеличить местную устойчивость стенок приданием им кривизны известны (рис. 2, а) [3, 4], однако распространения не получили, из-за отсутствия расчетного обоснования обеспечения местной устойчивости и назначения требуемых геометрических параметров [5]. Из литературных источников авторам известен только один стандарт LLOYD, содержащий рекомендации по расчету местной устойчивости радиусных стенок.

Цели работы – оценка критических напряжений местной устойчивости путем расчетно-экспериментального анализа, обоснование целесообразности использования криволинейных стенок в балках коробчатого сечения, а также определение и экспериментальное подтверждение расчетных зависимостей для оценки критических напряжений местной устойчивости.

Рис. 1. Потеря местной устойчивости элементов подъемно-транспортных машин и мостов
Fig. 1. Loss of local stability of elements of carrying and lifting machines and bridges

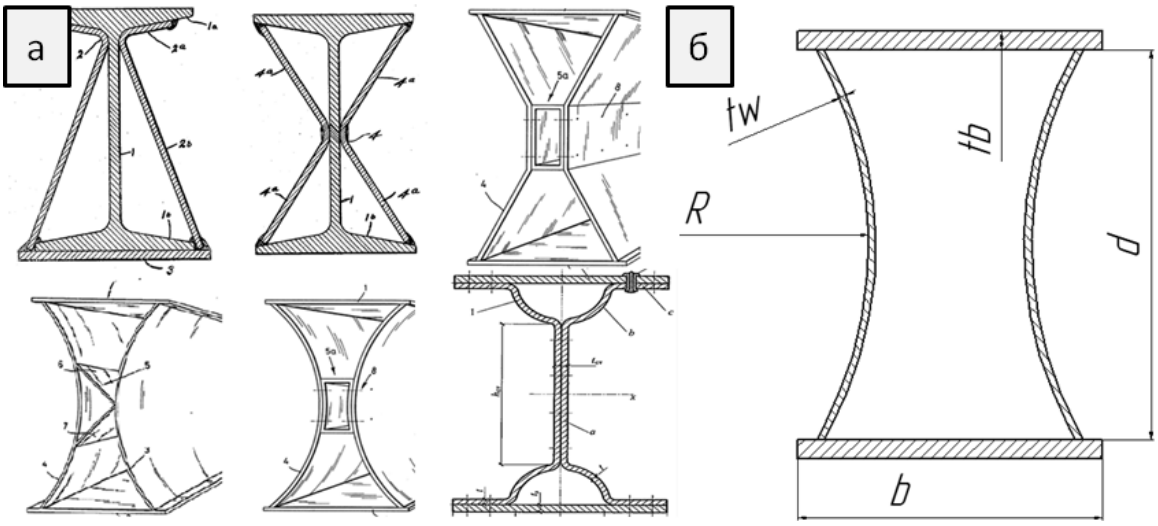


Рис. 2. Существующие патенты балок – а); коробчатая балка с криволинейными стенками – б)

Fig. 2. Existing patents of beams – a); box beam with non-linear walls – б)

Численное моделирование

Стенки коробчатых балок подвергаются различному нагружению. При подвижной нагрузке на балке ее стенки в сжатой зоне могут нагружаться только сжатием, сжатием с изгибом, только сдвигом или одновременно сдвигом и сжатием. Также различными могут быть условия опирания стенок по контуру – от шарнирного опирания до заделки. При аналитическом исследовании рассматривается или шарнирное опирание стенки или ее заделка, однако в реальных конструкциях имеет место промежуточный вариант с конечной жесткостью. Многообразие влияющих факторов заставляет исследовать устойчивость криволинейных стенок непосредственно в составе балок при вариации геометрических параметров и различном нагружении.

В работе эффективность применения криволинейных стенок, изогнутых по радиусу, по сравнению с прямыми стенками в коробчатых балках исследовалась численно в среде конечно-элементного моделирования Ansys. Рассмотрены три варианта радиуса кривизны стенки R = 2000 мм, 4000 мм и ∞. Радиус кривизны R = ∞ соответствует прямой стенке. Рассматривалась балка длиной 1 м, нагруженная сжимающей нагрузкой по свободным торцам. Формы потери устойчивости стенок показаны на рис. 3,а. Результаты исследований влияния кривизны стенки на критические напряжения σ_{cr} местной устойчивости приведены на рис. 3, б. Видно, что балка с кривизной стенки радиусом 2000 мм имеет устойчивость по напряжениям в 2,5 раза большую по сравнению с балкой с прямыми стенками.

В работе [6] показано, что при радиусе кривизны R = 1500 мм и толщине стенки t_w = 6 мм ее устойчивость при сжатии в составе балки по критическим напряжениям σ_{cr} возрастает в 4 раза по сравнению с аналогичной, но прямой стенкой.

Была проведена серия расчетов балки длиной 15 м, загруженной в середине панели, длиной a = 3 м, сосредоточенной силой (рис.4, в). Форма потери местной устойчивости прямой стенки при изгибе показана на рис. 4,а. При наличии кривизны стенки форма потери устойчивости сохраняется, но область потери устойчивости локализуется ближе к сжатой зоне стенки (рис. 4, б)

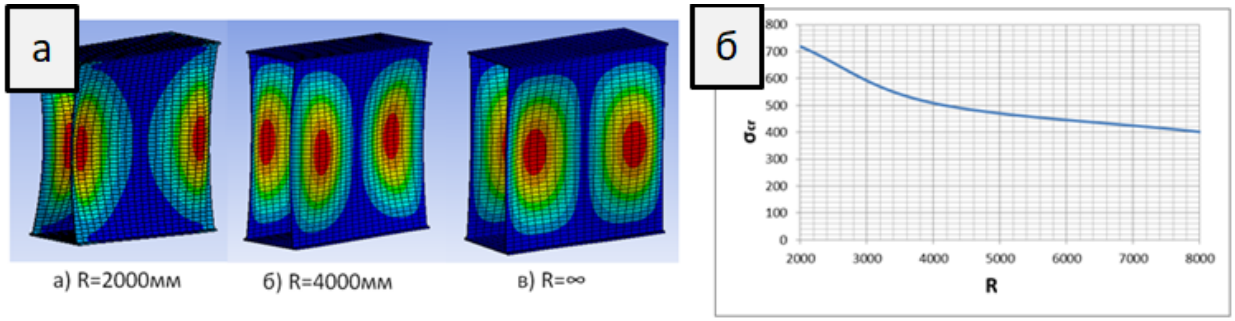


Рис. 3. Формы потери устойчивости стенки при сжатии – а); зависимость критических напряжений потери устойчивости стенки от радиуса кривизны – б)

Fig. 3. Forms of stability loss of the wall during compression – a); dependence of the critical stresses of wall stability loss on the curvature –б)

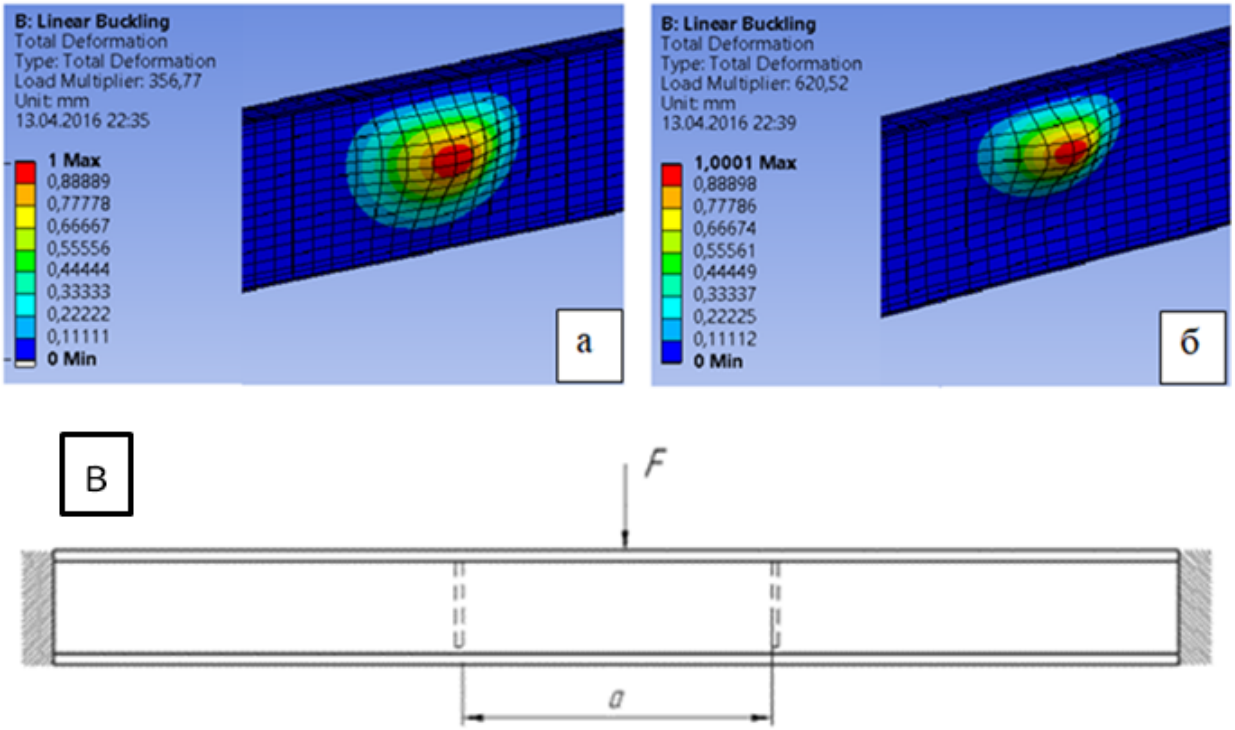


Рис. 4. Формы потери устойчивости: прямой стенки – а), стенки изогнутой по радиусу – б) схема балки – в),

Fig. 4. Forms of stability loss: a straight wall – a), a wall curved along the radius – б) a beam scheme – в),

Расчеты с варьированием относительного радиуса в диапазоне $a/R = 0.2–1.8$, соответствующего фактическому изменению радиуса кривизны $R = 1800–15000$ мм, показали рост критического напряжения σ_{cr} с ростом a/R почти в 3 раза. На рис. 5 точками показаны рассчитанные варианты и нелинейная зависимость $\sigma_{cr} = f(a/R)$

Проведенный анализ показывает, что кривизна стенки в несколько раз увеличивает значение критического напряжения потери местной устойчивости. Однако для практического конструирования и применения балок с криволинейными стенками необходимо располагать зависимостями влияния конструктивных параметров балок на критические напряжения

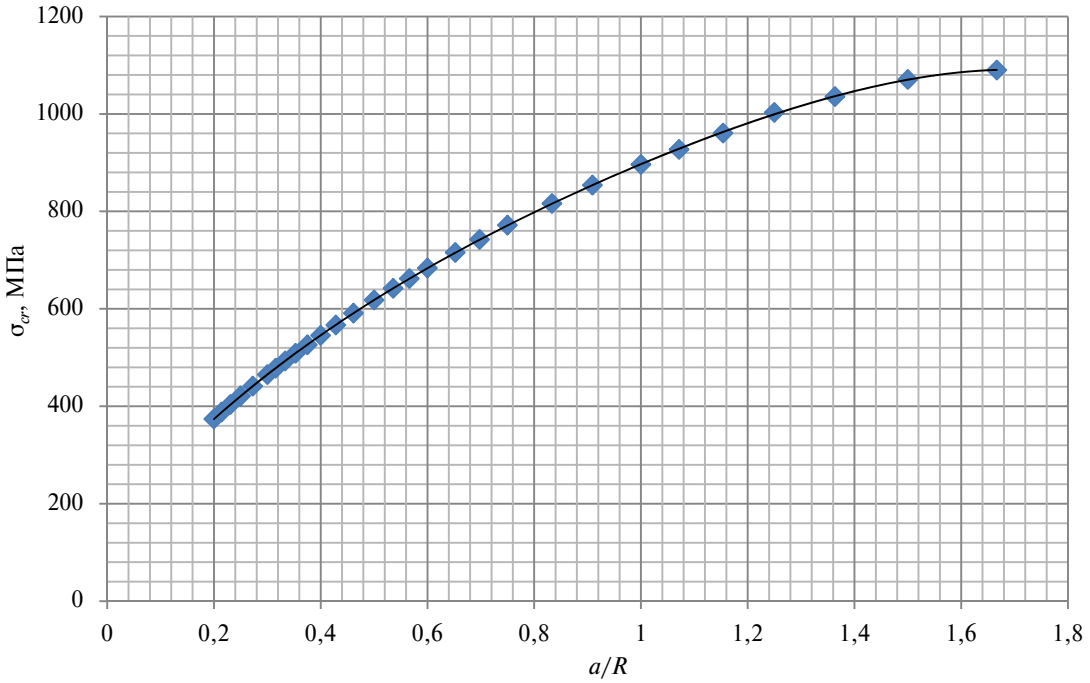


Рис. 5. Зависимость $\sigma_{cr} = f(a/R)$ при d = 1536 мм, t_b = 18 мм, t_w = 6 мм, b = 1000 мм
Fig. 5. Dependence $\sigma_{cr} = f(a/R)$ *where* d = 1536 mm, t_b = 18 mm, t_w = 6 mm, b = 1000 mm

потери устойчивости. Общий вид такой зависимости, получаемой в результате обработки численного эксперимента, имеет вид

$$\sigma_{cr} = \frac{a_0 \cdot K_{S0} \cdot \left(\frac{t_b}{d}\right)^{a_1} \cdot \left(\frac{t_w}{d}\right)^{a_2}}{\left(\frac{R}{d}\right)^{a_3} \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^{a_4} \cdot \left(\frac{b}{d}\right)^{a_5}}, \qquad (1)$$

где d – высота; tb – толщина пояса; tw – толщина стенки; b – ширина пояса; R – радиус кривизны; K_{S0} – коэфициент, имеющий размерность МПа [7] и согласно решению, полученному методами теории упругости для пластины [8, 9], у которой $a > d$, вычисляют как $K_{S0} = \frac{\pi^2 E}{3(1-\mu^2)} \approx 760000$ МПа.

В работе [10] получены значения показателей степени a_0, ..., a_5 для балок с радиусными стенками при изгибе.

Было проведено численное моделирование исследуемых балок, работающих при нормальных и касательных напряжениях. Для балок с радиусными стенками ставился многофакторный эксперимент с варьированием всех геометрических параметров [11]. Диапазон варьирования параметров составил: d = 1000, 1600, 2000 мм, b = 400, 600, 800 мм, t_b = 10, 16, 20, 24 мм, t_w = 6, 10, 12, 16 мм, R = 2000, 4000, 8000 мм, $a/2$ = 500, 1000, 2000 мм. По результатам моделирования с учетом методики, изложенной в работе [10], получена расчетная зависимость для оценки критических напряжений в вид:

$$\sigma_{cr} = \frac{2{,}635 \cdot K_{S0} \cdot \left(\frac{t_w}{d}\right)^{2{,}965} \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^{0{,}194}}{\left(\frac{t_b}{d}\right)^{1{,}654} \cdot \left(\frac{R}{d}\right)^{0{,}398} \cdot \left(\frac{b}{d}\right)^{0{,}01}}. \qquad (2)$$

Экспериментальное исследование

С целью проверки корректности численных исследований и полученных расчетных зависимостей проведено экспериментальное исследование местной устойчивости коробчатых балок. В качестве предмета исследования выбраны консольные балки (рис. 6, б): балка

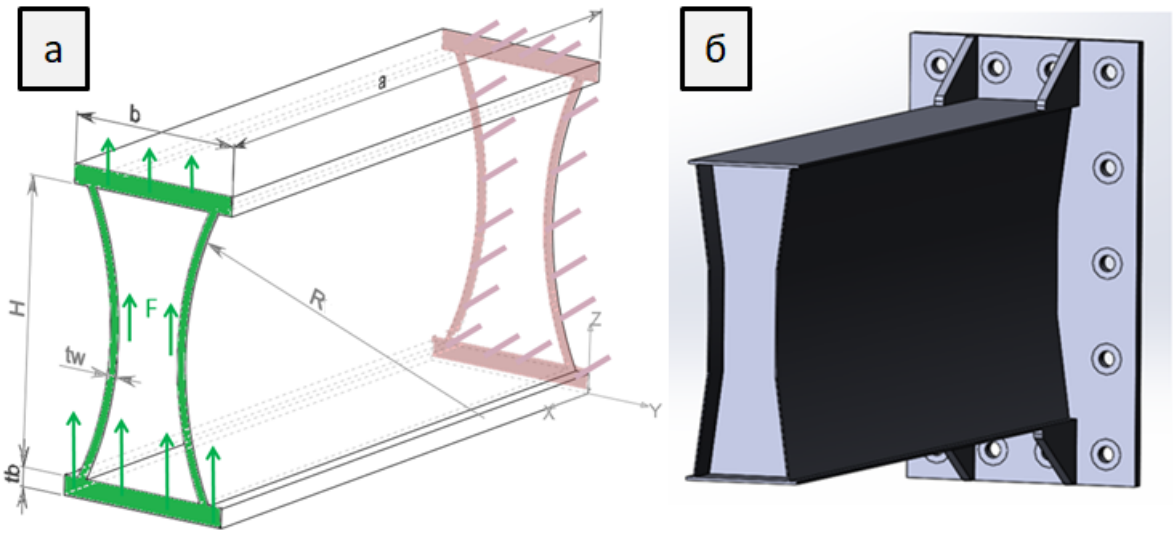


Рис. 6. Геометрические параметры коробчатой балки с криволинейными стенками (d = 200 мм; tb = 2 мм; tw = 1 мм; b = 75 мм пояса; R = 500 мм) – а), итоговая модель экспериментальной балки – б)

Fig. 6. Geometric parameters of a box-shaped beam with non-linear walls (d = 200 мм; tb = 2 мм; tw = 1 мм; b = 75 мм пояса; R = 500 мм) – а), model of a beam for the experiment – б)

с прямыми стенками и балка с радиусными стенками. Ограничениями по масштабу моделей и схеме нагружения являлись возможности экспериментального оборудования и предотвращение их разрушения до момента потери местной устойчивости. На рис. 6, а представлена геометрия исследуемой балки с радиусными стенками и принятыми размерами, схема нагружения и закрепления. Балка с прямыми стенками имела такие же размеры, схему нагружения и закрепления.

Балки изготавливались полуавтоматом в среде углекислого газа. Процесс сборки и сварки предусматривал прихватку стенок к поясам и последующую сварку с целью уменьшения деформаций. Однако избежать температурных деформаций стенок и появления бухтин совсем не удалось. Для чистоты эксперимента стенки обеих балок образмеривались, по полученным замерам строились трехмерные модели реальных балок и повторялись расчеты местной устойчивости в ANSYS Workbench.

Экспериментальная установка представляла балку (рис. 7), прикрепленную винтами к стойке. В работах [12, 13] для экспериментального исследования местной устойчивости балок были использованы механические тензометры. Их закрепление требует дополнительного оборудования, а снятие показаний с каждого тензометра происходит раздельно, что затрудняет оценку фиксации нагрузки в ходе эксперимента. В настоящей работе использовались тензорезисторы, что обусловило простоту их крепления на балку и возможность отображения показателей в виде графиков на одном экране в реальном времени. В сжатой зоне на балку приклеивались четыре тензорезистора с базой 10 мм, по 2 датчика на обе стенки балки. Компенсирующие датчики показаны на рис. 7, г. Измерения показаний тензорезисторов производились крейтом LTR-EU-2 (рис. 7, д) и передавались с помощью стандартного двадцатипятипинового разъема на компьютер (рис. 7, е). Данная модель крейта позволяет передавать показание с четырех установленных на балку датчиков одновременно. Для обработки полученных данных использовалась программа LGraph2.

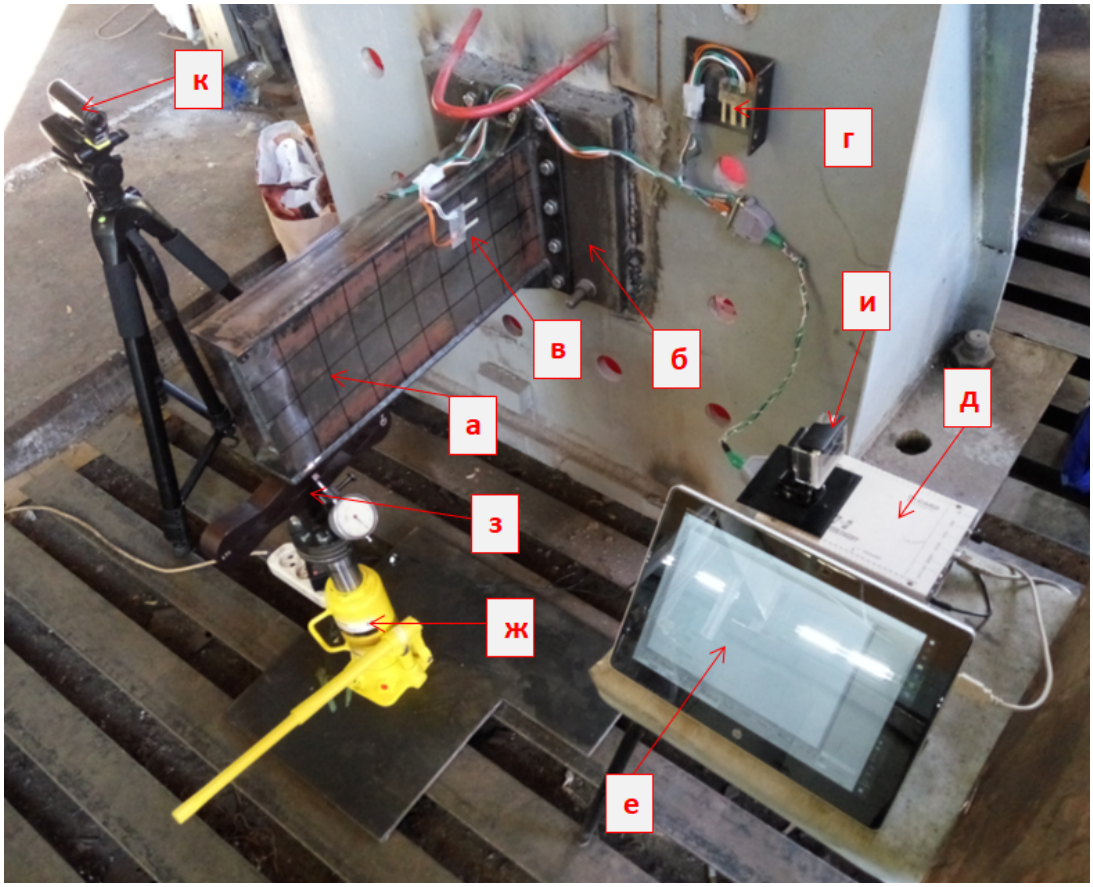


Рис. 7. Экспериментальная установка
Fig. 7. Facility for the experiment

Нагрузка с разгрузкой показала, что датчики приклеены и работают исправно. Нагрузка на балку создавалась ручным гидравлическим домкратом, то есть ступенчато. В коротких промежутках между шагами нагрузки усилие домкрата уменьшалось на 10–20 Н. Данная особенность негативного влияния на эксперимент не оказала, так как потеря местной устойчивости произошла в период увеличения нагрузки. Балка потеряла устойчивость в правой стенке ближе к свободному концу (рис. 8, а). Форма потери устойчивости соответствует потере местной устойчивости под действием касательных и нормальных напряжений. Такая же форма потери местной устойчивости была получена в ANSYS Workbench (рис. 8, б). Потеря местной устойчивости произошла мгновенно, с характерным звуком деформации металла. Этот результат запечатлен на одну из видеокамер (рис. 7, к).

Эксперимент на балке с криволинейными стенками проводился по той же схеме. В данном случае потеря устойчивости произошла без характерного звука деформации металла. Местную устойчивость потеряла левая стенка ближе к месту крепления фланца (рис. 8, в). Характер и направление волн совпадает с результатами моделирования.

В эксперименте балка с прямыми стенками потеряла устойчивость (рис. 9) при нагрузке – 19,1 кН и соответствующем этой нагрузке максимальном напряжении – 230 МПа. После разгрузки левый тензорезистор 1 и правый тензорезистор 2 пришли в исходное положение, а в левом тензорезисторе 2, правом тензорезисторе 1 образовались остаточные деформации.

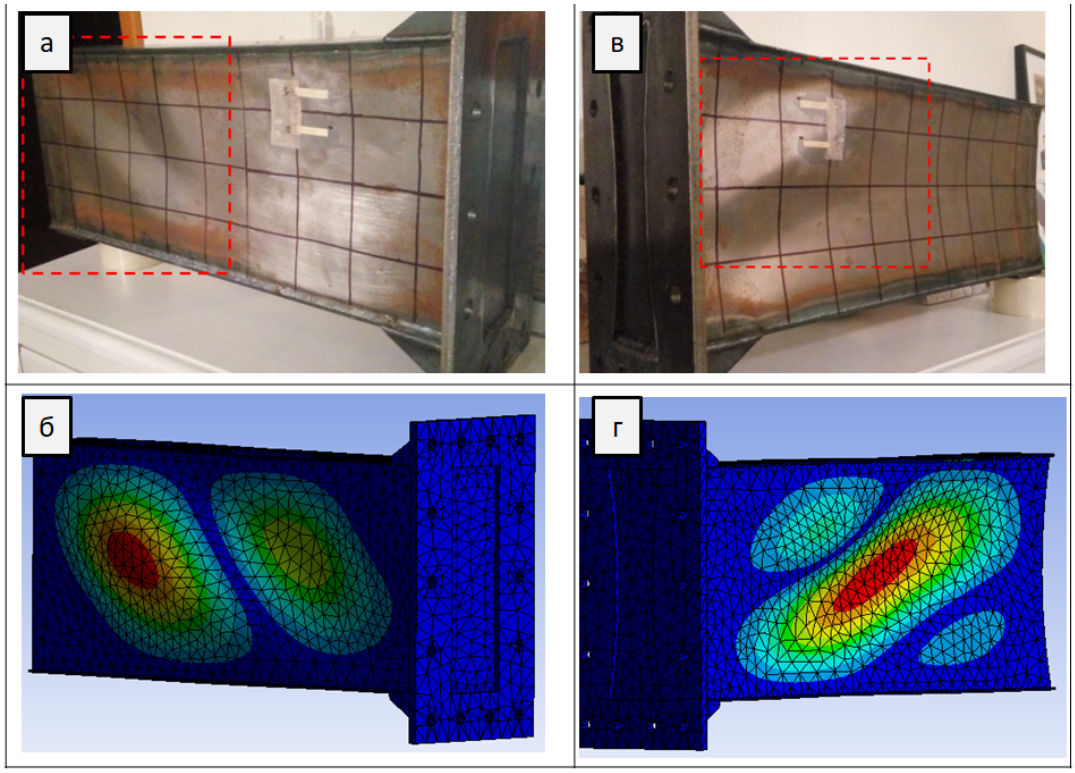


Рис. 8. Формы потери местной устойчивости балок: а) с прямыми стенками (экспериментальная модель), б) с прямыми стенками (расчет Ansys), в) с криволинейными стенками (экспериментальная модель), г) с криволинейными стенками (расчет Ansys)

Fig. 8. Forms of beams local stability loss: a) with straight walls (experimental model), б) with straight walls (Ansys calculation), в) with non-linear walls (experimental model), г) with curvilinear walls (Ansys calculation)

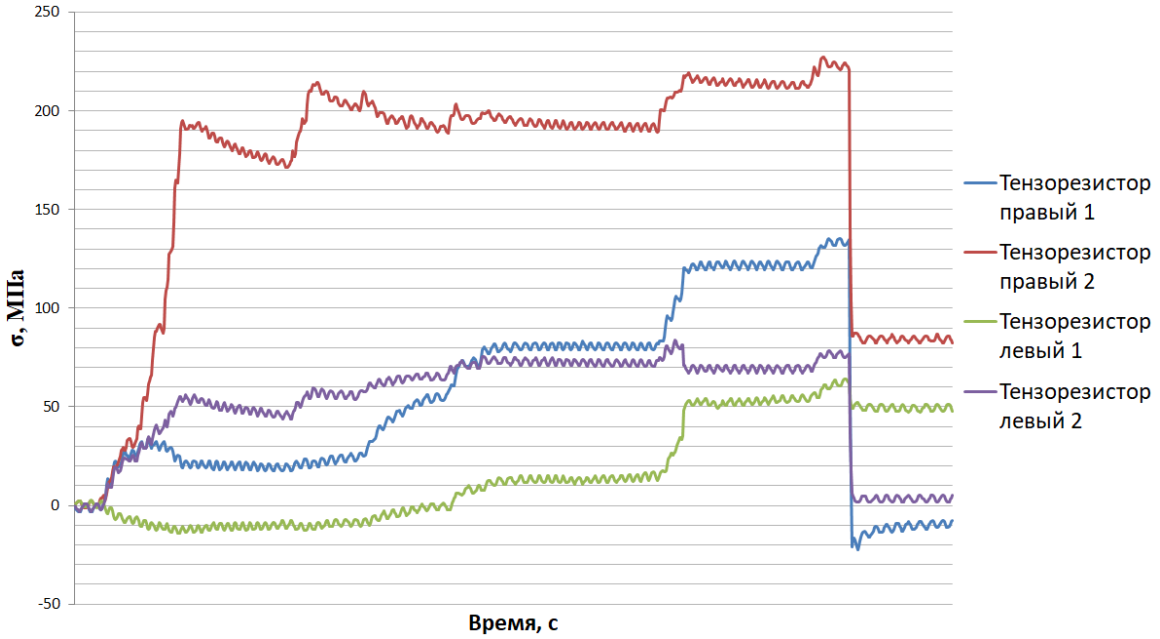


Рис. 9. Напряжения в стенках балки с прямыми стенками

Fig. 9. Strains in the walls of the beam with straight walls

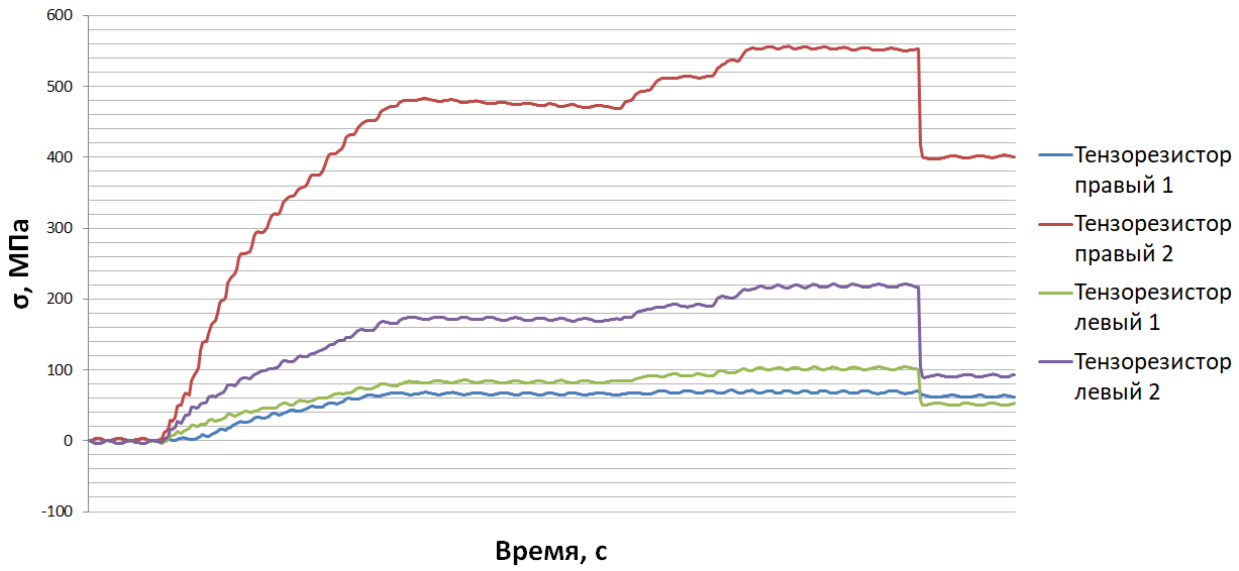


Рис. 10. График нагружения балки с криволинейными стенками

Fig. 10. Diagram of beams loading with linear walls

По зависимости ISO 20332:2016 для балки с прямыми стенками потеря устойчивости должна была произойти при напряжениях

$$\sqrt{4(k_\tau K_{SO}(t_w/d)^2)^2+(k_S K_{SO}(t_w/d)^2)^2}=$$

$$\sqrt{4\left(1{,}38\cdot 760000\left(\frac{1}{200}\right)^2\right)^2+\left(8{,}08\cdot 760000\left(\frac{1}{200}\right)^2\right)^2}=$$

$$=162\text{ МПа}.$$

Согласно численному расчету МКЭ потеря устойчивости должна была произойти при нагрузке в 19,8 кН, что соответствует критическим напряжениям 300 МПа.

В ходе эксперимента на балке с криволинейными стенками тензорезистор 1 перестал жестко фиксироваться на стенке, что видно из полученного графика (рис. 10). Балка потеряла устойчивость при следующем параметрах нагружения (рис. 10): нагрузка – 30,2 кН, максимальное напряжение – 560 МПа.

По полученной расчетной зависимости (2) для балки с криволинейными стенками потеря местной устойчивости должна произойти при значении критических напряжений

$$\sigma_{cr}=\frac{2.635\cdot K_{S0}\cdot\left(\frac{t_w}{d}\right)^{2.965}\cdot\left(\frac{a}{d}\right)^{0.194}}{\left(\frac{t_b}{d}\right)^{1.654}\cdot\left(\frac{R}{d}\right)^{0.398}\cdot\left(\frac{b}{d}\right)^{0.01}}=$$

$$=\frac{2.635\cdot 760000\cdot\left(\frac{1}{200}\right)^{2.965}\cdot\left(\frac{500}{200}\right)^{0.194}}{\left(\frac{2}{200}\right)^{1.654}\cdot\left(\frac{500}{200}\right)^{0.398}\cdot\left(\frac{75}{200}\right)^{0.01}}=513\text{ МПа}.$$

Согласно расчету МКЭ потеря устойчивости должна произойти при нагрузке в 32,2 кН, что соответствует критическим напряжениям 550 МПа.

Обсуждение результатов

Численное моделирование балок коробчатого сечения с прямыми и криволинейными стенками показывает, что придание стенкам кривизны по радиусу повышает их местную устойчивость в 2,5–4 раза. Результаты экспериментального исследования коробчатых балок с прямыми и изогнутыми по радиусу стенками так же подтверждают этот вывод.

Сравнение нагрузок и напряжений в эксперименте и расчете

Comparison of loads and stresses in the experiment and calculation

Источник данных		Коробчатая балка с прямыми стенками		Коробчатая балка с криволинейными стенками	
		Критические напряжения, МПа	Нагрузка, кН	Критические напряжения, МПа	Нагрузка, кН
Экспериментальное исследование		230	19,1	560	30,2
Метод конечных элементов		300	19,8	550	32,2
Расчет по зависимостям	ISO 20332	162	–	–	–
	(2)	–	–	513	–

Итоговые результаты данного исследования приведены в сводной таблице.

Наблюдается хорошее соответствие результатов расчетов и эксперимента, особенно в балке с криволинейными стенками. Расхождение напряжений, полученных в эксперименте, расчетом МКЭ и по зависимости ISO 20332:2016 в балке с прямыми стенками, по-видимому, является следствием не точного отражения в расчетах сварочных деформаций стенок.

Кроме этого, результаты экспериментальных исследований подтверждают корректность расчетных зависимостей, полученных в работе [10].

Заключение

Сравнительные расчетные и экспериментальные исследования коробчатых балок с прямыми и криволинейными стенками доказывают, что балки с криволинейными стенками имеют в разы более высокие характеристики местной устойчивости. Это обосновывает эффективность их применения в конструкциях различных машин и сооружений. Численное моделирование балок коробчатого сечения с прямыми и криволинейными стенками показывает, что придание стенкам кривизны по радиусу повышает их местную устойчивость в 2,5–4 раза. Полученные зависимости для оценки критических напряжений местной устойчивости криволинейных стенок позволяют проектировать такие коробчатые балки с учетом влияния их геометрических параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Web Buckling Study of the Behaviour and Strength of Perforated Steel Beams with different Novel Web Opening Shapes, Konstantinos-Daniel Tsavdaridis, Cedric D'Mello, School of Engineering and Mathematical Sciences, City University London, 2011.

[2] **Заборова Д.Д., Дунаевская Ю.П.** Преимущества и особенности применения гофро-балки в строительстве // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014 Вып. 7 (22). С. 37–42.

[3] **Aust R.** Als Kastentrager ausgebildeter Krantrager. Patent EP 0293789 A1 Germany. 10.10.2001.

[4] **Watson G.** Method for reinforcement beams. Patent. 1989834 USA. 5.02.1935.

[5] **Наумов А.В.** Ездовые балки с криволинейными стенками // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: матер. Междунар. науч.-технич. конф. / под общ. ред. Ш.М. Мерданова. Тюмень: ТИУ, 2016. С. 195–200.

[6] **Манжула К.П., Наумов А.В.** О местной устойчивости балок с прямолинейными и криволинейными стенками/ Интерстроймех–2018: сб. докл. XXI Междунар. науч.-технич. конф. (г. Москва, 8–12 октября 2018 г.). М.: Изд-во МИСИ–МГСУ, 2018. С. 115–122. URL: http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkrdostupa

[7] **Манжула К.П., Наумов А.В.** Влияние кривизны стенок коробчатых балок на местную устойчивость. Современное машиностроение: Наука и образование. СПб.: Изд-во Политехн. уни-та, 2016. С. 824–830.

[8] **Соколов С.А.** Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. СПб.: Политехника, 2005. 423 с.

[9] **Тимошенко С.П.** Устойчивость упругих систем. М.; Л.: ОГИЗ-Гостехиздат, 1946. 532 с.

[10] **Manzhula K.P., Naumov A.V.** Influence of flections' radius value to local buckling of box-shaped beams with non-linear walls // International Review of Mechanical Engineering (I.RE.M.E.). 2017. Vol. 11, no. 5.

[11] **Сидняев Н.И.** Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. М.: Юрайт, 2014.

[12] Cellular buckling from mode interaction in I-beams under uniform bending, M. Ahmer Wadee, and Leroy Gardner, Department of Civil & Environmental Engineering, Imperial College London, London SW7 2AZ, UK, 2012.

[13] Web Buckling Study of the Behaviour and Strength of Perforated Steel Beams with different Novel Web Opening Shapes, Konstantinos-Daniel Tsavdaridis, Cedric D'Mello, School of Engineering and Mathematical Sciences, City University London, 2011.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НАУМОВ Александр Владимирович – *аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*
E-mail: skisk8fmx@gmail.com
МАНЖУЛА Константин Павлович – *доктор технических наук заведующий кафедрой Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
E-mail: conpaman@gmail.com

Статья поступила в редакцию: 04.07.2019

REFERENCES

[1] Web Buckling Study of the Behaviour and Strength of Perforated Steel Beams with different Novel Web Opening Shapes, Konstantinos-Daniel Tsavdaridis, Cedric D'Mello, School of Engineering and Mathematical Sciences, City University London, 2011

[2] **D.D. Zaborova, Yu.P. Dunayevskaya,** Preimushchestva i osobennosti primeneniya gofro-balki v stroitelstve, Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy, 7 (22) 2014 37–42.

[3] **R. Aust,** Als Kastentrager ausgebildeter Krantrager. Patent EP 0293789 A1 Germany. 10.10.2001

[4] **G. Watson,** Method for reinforcement beams. Patent. 1989834 USA. 5.02.1935.

[5] **A.V. Naumov,** Yezdovyye balki s krivolineynymi stenkami, Nazemnyye transportno-tekhnologicheskiye kompleksy i sredstva: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. Pod obsh. red. Sh.M. Merdanova. Tyumen: TIU, (2016) 195–200.

[6] **K.P. Manzhula, A.V. Naumov,** O mestnoy ustoychivosti balok s pryamolineynymi i krivolineynymi stenkami/ Interstroymekh–2018: sb. Dokl. XXI Mezhdunar. nauch.-tekhnich. Konf. (g. Moskva, 8–12 oktyabrya 2018 g.). M.: Izd-vo MISI–MGSU, (2018) 115–122. URL: http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkrdostupa

[7] **K.P. Manzhula, A.V. Naumov,** Vliyaniye krivizny stenok korobchatykh balok na mestnuyu ustoychivost. Sovremennoye mashinostroyeniye: Nauka i obrazovaniye. SPb.: Izd. Politekhn. uni-ta, (2016) 824–830.

[8] **Sokolov S.A.** Metallicheskiye konstruktsii podyemno-transportnykh mashin. SPb.: Politekhnika, 2005.

[9] **S.P. Timoshenko,** Ustoychivost uprugikh system. M.; L.: OGIZ-Gostekhizdat, 1946.

[10] **K.P. Manzhula, A.V. Naumov,** Influence of flections' radius value to local buckling of box-shaped beams with non-linear walls, International Review of Mechanical Engineering (I.RE.M.E.), 11 (5) (2017).

[11] **N.I. Sidnyayev,** Teoriya planirovaniya eksperimenta i analiz statisticheskikh dannykh. M.: Yurayt, 2014.

[12] Cellular buckling from mode interaction in I-beams under uniform bending, M. Ahmer Wadee, and Leroy Gardner, Department of Civil & Environmental Engineering, Imperial College London, London SW7 2AZ, UK, 2012.

[13] Web Buckling Study of the Behaviour and Strength of Perforated Steel Beams with different Novel Web Opening Shapes, Konstantinos-Daniel Tsavdaridis, Cedric D'Mello, School of Engineering and Mathematical Sciences, City University London, 2011.

THE AUTHORS

NAUMOV Aleksandr V. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*
E-mail: skisk8fmx@gmail.com
MANZHULA Konstantin P. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*
E-mail: conpaman@gmail.com

Received: 04.07.2019

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019

DOI: 10.18721/JEST.25309
УДК 629.7.023

В.Е. Стрижиус

Национальный исследовательский университет «МАИ», г. Москва, Россия

ОСОБЕННОСТИ ДИАГРАММ ПОСТОЯННОЙ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

Представлен обзор и краткий анализ четырех известных моделей диаграмм постоянной усталостной долговечности слоистых полимерных композиционных материалов, наиболее часто встречаемых в научных публикациях. Отмечены основные достоинства и недостатки представленных моделей. В качестве определенной альтернативы рассмотренных диаграмм для инженерных расчетов усталостных характеристик слоистых композитов при различных коэффициентах асимметрии R циклического нагружения предложена специальная модификация диаграммы Харриса. На примере построения предложенной диаграммы для образцов со свободными отверстиями из ламината углепластика типа AS4-PW показано хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных, что позволяет надеяться на приемлемую точность расчетных оценок характеристик усталостной прочности слоистых композитов с использованием этой диаграммы. Представлен пример использования диаграммы при расчетных оценках усталостной долговечности образцов со свободным отверстием из ламината углепластика типа T300/5208 [45/0/-45/90]2s при квазислучайном программном нагружении.

Ключевые слова: слоистые полимерные композиционные материалы, усталостная долговечность, кривая усталости, асимметрия циклического нагружения, диаграмма постоянной усталостной долговечности.

Ссылка при цитировании:
Стрижиус В.Е. Особенности диаграмм постоянной усталостной долговечности слоистых композитов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 3. С. 120–132. DOI: 10.18721/JEST.25309

V.E. Strizhius

National Research University «Moscow Aviation Institute», Moscow, Russia

CONSTANT-LIFE DIAGRAMS OF LAYERED COMPOSITES

A review and a brief analysis of four well-known constant-life diagram models of layered composites, most often encountered in scientific publications, are presented. The main advantages and disadvantages of models are noted. A special modification of the Harris diagram was proposed as an alternative to the given diagrams for engineering predictions of fatigue characteristics of layered composites at different asymmetry coefficients R of cyclic loading. Using the example of constructing the proposed diagram for CFRP AS4-PW open-hole specimens, a good agreement between the calculated and experimental data is shown, which makes it possible to hope for acceptable accuracy of the calculated estimates of fatigue strength characteristics of layered composites using this diagram. An example of using the diagram for estimation of fatigue life of CFRP T300/5208 [45/0/-45/90]2s open-hole specimens under quasi-random program loading is presented.

Keywords: layered composites, fatigue life, S-N curve, asymmetry of cyclic loading, constant-life diagram.

Citation:
V.E. Strizhius, Constant-life diagrams of layered composites, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 25 (03) (2019) 120–132. DOI: 10.18721/JEST.25309

Введение. Известно, что большое значение при использовании полимерных композиционных материалов (ПКМ) приобретает возможность управления их физико-механическими характеристиками, в том числе характеристиками сопротивления усталости. Одной из таких характеристик является диаграмма постоянной усталостной долговечности (ДПУД), «связывающая» средние значения и амплитуды циклического напряжения при постоянной усталостной долговечности слоистого ПКМ. Диаграммы постоянной усталостной долговечности являются аналогом известных диаграмм предельных амплитуд цикла, применяемых при расчетных оценках усталостных характеристик металлических элементов.

С помощью ДПУД можно решать одну из важнейших задач усталостной прочности слоистых ПКМ – получать кривые усталости при различных коэффициентах асимметрии R циклического нагружения. Следует отметить особое значение решения этой задачи при инженерных расчетах усталостной долговечности слоистых ПКМ, когда предполагается, что объем известных экспериментальных данных будет достаточно ограниченным.

Обзору и анализу различных моделей ДПУД посвящены многие научные публикации, среди которых можно выделить, прежде всего, работы [1–3].

В настоящей статье представлен обзор и краткий анализ четырех известных моделей ДПУД, наиболее часто встречаемых в научных публикациях. К таким моделям можно отнести следующие:

1. Асимметричная диаграмма Гудмана [1].
2. Нелинейная асимметричная диаграмма Гербера [1].
3. Колоколообразная диаграмма Харриса [1–6].
4. Анизоморфные диаграммы Каваи [1–2, 7–12].

Отмечены основные достоинства и недостатки перечисленных моделей.

В качестве определенной альтернативы рассмотренных диаграмм для инженерных расчетов усталостных характеристик слоистых ПКМ при различных коэффициентах асимметрии R циклического нагружения предложена специальная модификация диаграммы Харриса, *позволяющая выполнять подобные расчеты с достаточно высокой точностью и приемлемой трудоемкостью.*

Обзор и анализ известных моделей ДПУД

Ниже представлен краткий обзор и анализ представленных выше моделей ДПУД.

Асимметричная диаграмма Гудмана. Асимметричная диаграмма Гудмана учитывает различие прочности слоистых ПКМ при растяжении и сжатии и по данным работы [1] может быть выражена в следующей форме:

$$-\frac{\sigma_a - \sigma_a^{R=-1}}{\sigma_a^{R=-1}} = \begin{cases} \sigma_m / \sigma_{UTS}, & 0 \le \sigma_m \le \sigma_{UTS}, \\ \sigma_m / \sigma_{UCS}, & \sigma_{UCS} \le \sigma_m \le 0, \end{cases}$$

где σ_a – амплитуда циклических напряжений растяжения-сжатия; $\sigma_a^{R=-1}$ – амплитуда симметричного цикла нагружения, соответствующая *определенной* (*фиксированной*) усталостной долговечности слоистого ПКМ; σ_m – среднее напряжение цикла нагружения; σ_{UTS} – предел прочности рассматриваемого ПКМ при растяжении; σ_{UCS} – предел прочности рассматриваемого ПКМ при сжатии.

Безусловным достоинством асимметричной диаграммы Гудмана является простота использования и приемлемый объем необходимых исходных данных.

В работе [1] отмечается, что к достоинствам асимметричной диаграммы Гудмана можно также отнести приемлемую точность расчетных характеристик усталостной прочности слоистых ПКМ, получаемых при ее использовании.

Однако этот вывод можно подвергнуть определенному сомнению. На рис. 1 приведен пример асимметричной диаграммы Гудмана для образцов со свободными отверстиями из ламината углепластика типа AS4-PW. При построении диаграммы использованы экспериментальные данные работы [13], которые получены из кривых усталости для рассматриваемых образцов при различных коэффициентах асимметрии R – см. рис. 2.

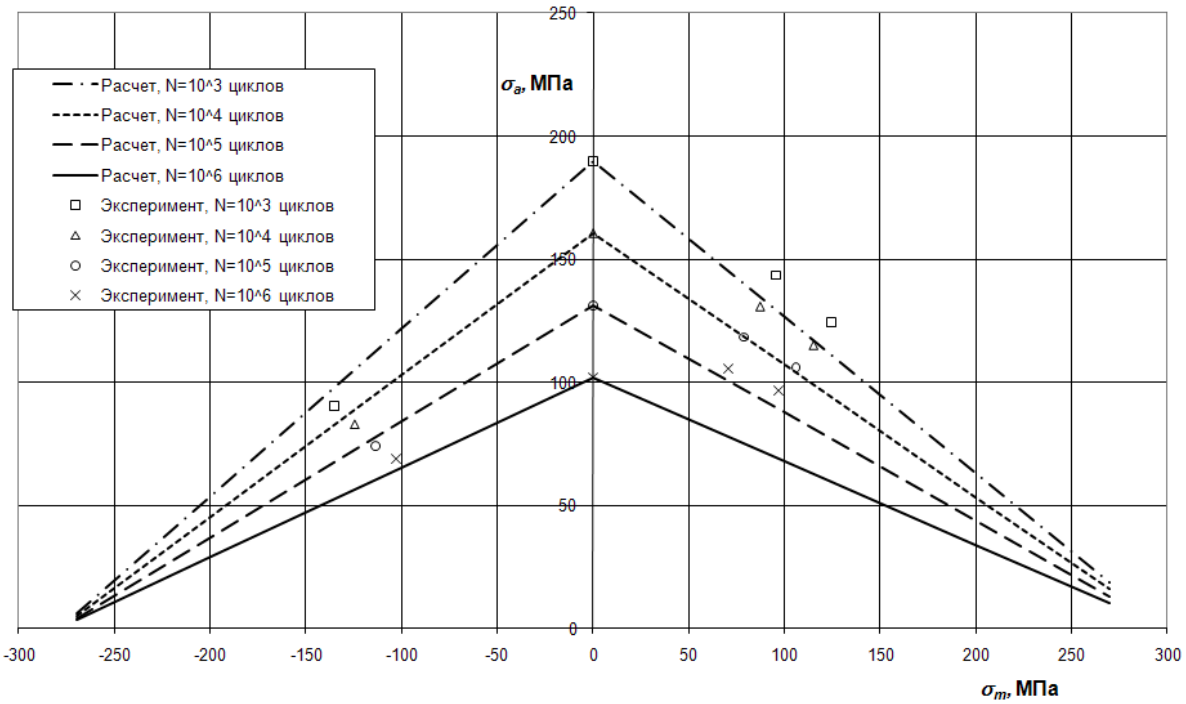


Рис. 1. Асимметричная диаграмма Гудмана для образцов со свободными отверстиями из ламината углепластика типа AS4-PW

Fig. 1. Asymmetric Goodman diagram for CFRP AS4-PW open-hole specimens

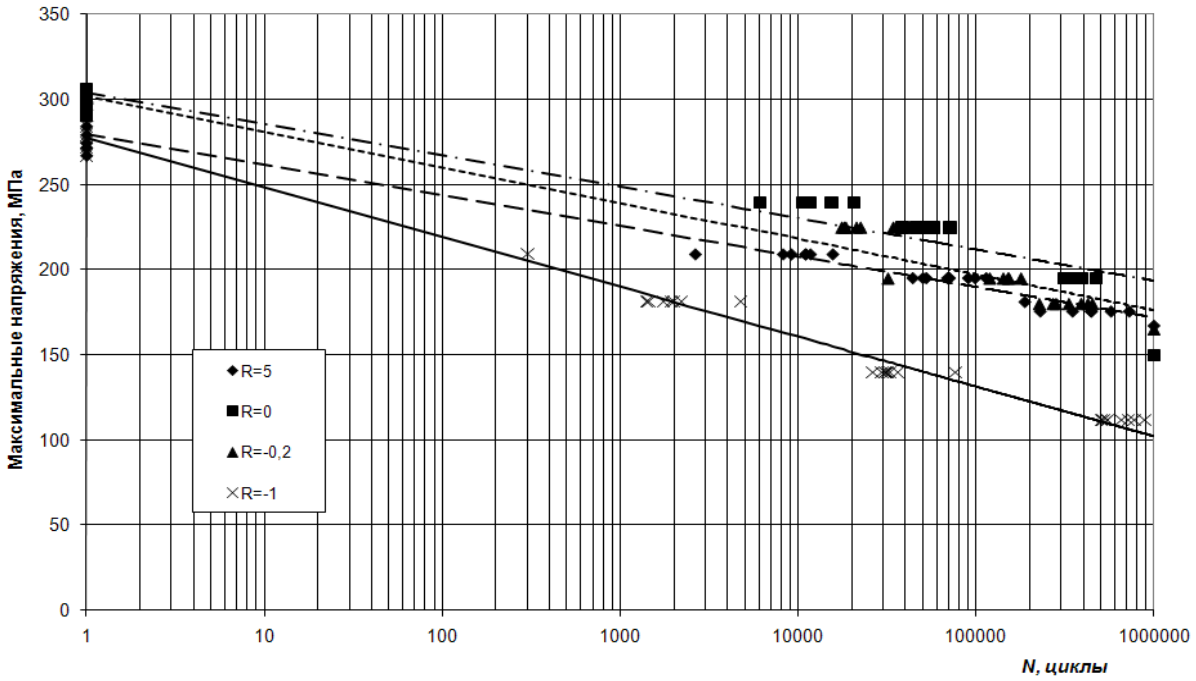


Рис. 2. Кривые усталости образцов со свободными отверстиями из ламината углепластика типа AS4-PW (использованы данные работы [13])

Fig. 2. S-N curves for CFRP AS4-PW open-hole specimens (data from [13] were used)

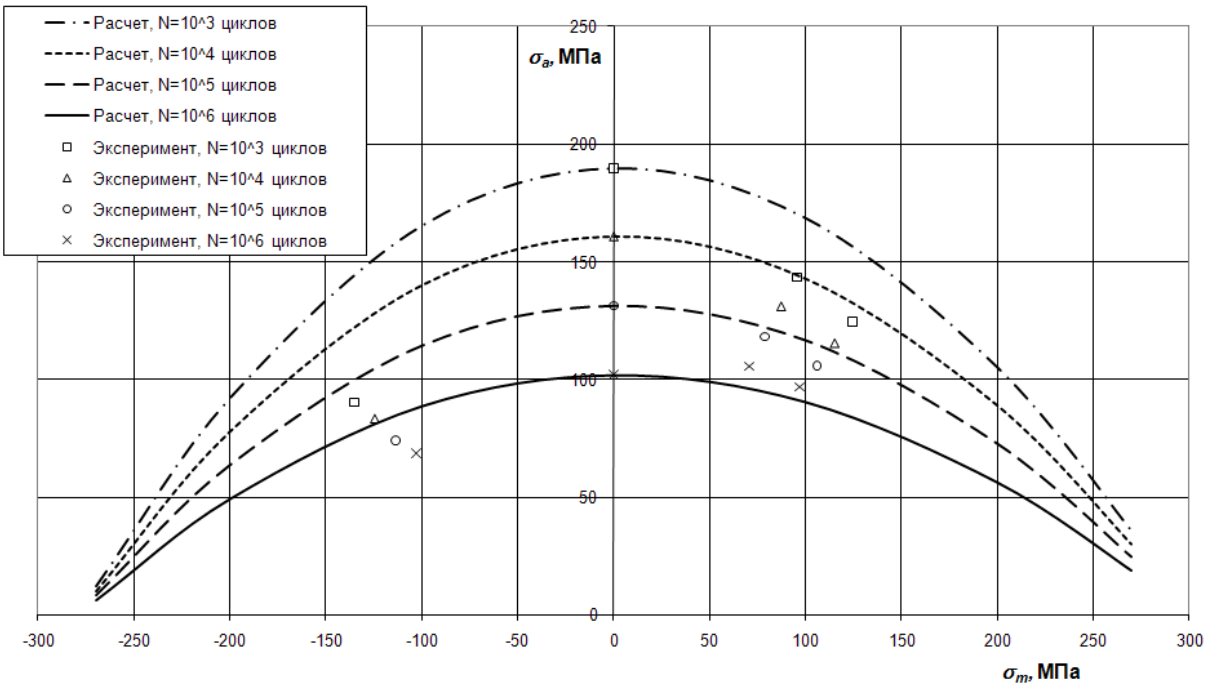


Рис. 3. Асимметричная диаграмма Гербера для образцов со свободными отверстиями из ламината углепластика типа AS4-PW

Fig. 3. Asymmetric Gerber diagram for CFRP AS4-PW open-hole specimens

Как следует из анализа данных, представленных на рис. 1, в области положительных средних напряжений циклического нагружения совпадение расчетных и экспериментальных значений асимметричной диаграммы Гудмана нельзя признать удовлетворительным.

Кроме этого, многие исследователи, в частности, авторы работ [1–2], отмечают, что линейный характер асимметричной диаграммы Гудмана не находит подтверждения в эксперименте.

Нелинейная асимметричная диаграмма Гербера. Нелинейная асимметричная диаграмма Гербера по данным работы [1] может быть выражена в следующей форме:

$$-\frac{\sigma_a - \sigma_a^{R=-1}}{\sigma_a^{R=-1}} = \begin{cases} \sigma_m / \sigma_{UTS})^2, & (0 \le \sigma_m \le \sigma_{UTS}, \\ \sigma_m / \sigma_{UCS})^2, & (\sigma_{UCS} \le \sigma_m \le 0. \end{cases}$$

Безусловным достоинством нелинейной асимметричной диаграммы Гербера, также, как и асимметричной диаграммы Гудмана, является простота ее использования и приемлемый объем необходимых исходных данных.

В работе [1] не приведены какие-либо данные о точности определения расчетных характеристик усталостной прочности слоистых ПКМ при использовании этой диаграммы.

На рис. 3 приведен пример нелинейной асимметричной диаграммы Гербера для образцов со свободными отверстиями из ламината углепластика типа AS4-PW. При построении диаграммы использованы экспериментальные данные работы [13].

Как следует из анализа данных, представленных на рис. 3, совпадение расчетных и экспериментальных значений диаграммы Гербера в представленном примере нельзя признать удовлетворительным.

Колоколообразная диаграмма Харриса. Достаточно «революционный» отказ от традиционной диаграммы Гудмана был сделан Харрисом и соавторами в работах [3–5]. Ими была

предложена так называемая колоколообразная диаграмма, процедуру построения которой можно представить следующим образом.

1. Предполагается, что условие постоянной усталостной долговечности слоистых ПКМ для разных уровней асимметрии цикла нагружения может определяться параметрической зависимостью:

$$a = f(1-m)^{u}(c+m)^{\nu}, \qquad (1)$$

где $a = \sigma_a/\sigma_{UTS}$ – относительная амплитуда циклических напряжений растяжения-сжатия; $m = \sigma_m/\sigma_{UTS}$ – относительное среднее напряжение цикла нагружения; $c = \sigma_{UCS}/\sigma_{UTS}$ – соотношение пределов прочности рассматриваемого элемента при сжатии и растяжении; f, u и ν – параметры, зависящие от усталостной долговечности рассматриваемого ПКМ.

2. Выражение (1) можно переписать как

$$\sigma_{a\,i} = f\cdot\sigma_{UTS}^{1-u-\nu}\cdot(\sigma_{UTS}-\sigma_{m\,i})^{u}\times \times(|\sigma_{UCS}|+\sigma_{m\,i})^{\nu}. \qquad (1,a)$$

3. По данным работы [6] значения параметра f могут значительно различаться для углепластиков и стеклопластиков. Харрис и его коллеги предложили определять значения параметра f с использованием соотношения:

$$f = Ac^{-p}, \qquad (2)$$

где A и p – эмпирические вариации от $\log N_f$, которые, в свою очередь, могут определяться с использованием соотношений:

$$A = 0,94 + 0,014\log N_f;$$

$$p = 0,938 + (8,4\cdot 10^{-4})\exp\left(\frac{\log N_f}{1,016}\right),$$

где N_f – заданная усталостная долговечность слоистого ПКМ.

По данным работы [3] приемлемые по точности результаты для широкого спектра углепластиков и стеклопластиков дает использование соотношения (2) в виде:

$$f = 0,71c^{-1,05}. \qquad (2,a)$$

4. По данным работы [5] значения параметров u и ν могут быть определены как

$$u = 0,033\lg N + 2,032; \quad \nu = 0,068\lg N + 2,089.$$

Значения параметров u и ν, соответствующие фиксированным усталостным долговечностям N, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения параметров u и ν, соответствующие фиксированным усталостным долговечностям N

The values of the parameters u and ν, corresponding to fixed fatigue life N

N, циклы	u	ν
1000	2,131	2,293
10 000	2,164	2,361
100 000	2,197	2,429
1 000 000	2,230	2,497

По данным работ [1–6] безусловным достоинством колоколообразной диаграммы Харриса является «физичность» формы диаграммы, которая подтверждена многими исследователями.

Многие исследователи отмечают также приемлемую точность расчетных оценок с использованием этой диаграммы. Однако в отдельных случаях с этим доводом нельзя согласиться, см., например, рис. 4 (при построении диаграммы использовано соотношение (2,а)).

Анизоморфные диаграммы Каваи. В качестве определенного развития колоколообразной диаграммы Харриса можно считать формирование аниморфных диаграмм Каваи [1, 2, 7–12].

Каваи и соавторы в указанных работах разработали формулу, которая описывает асимметричную диаграмму постоянной усталостной долговечности, обозначенную как *анизоморфная* диаграмма постоянной усталостной долговечности. Основная характеристика этой диаграммы состоит в том, что она может быть построена с использованием только одной экспериментально полученной кривой усталости,

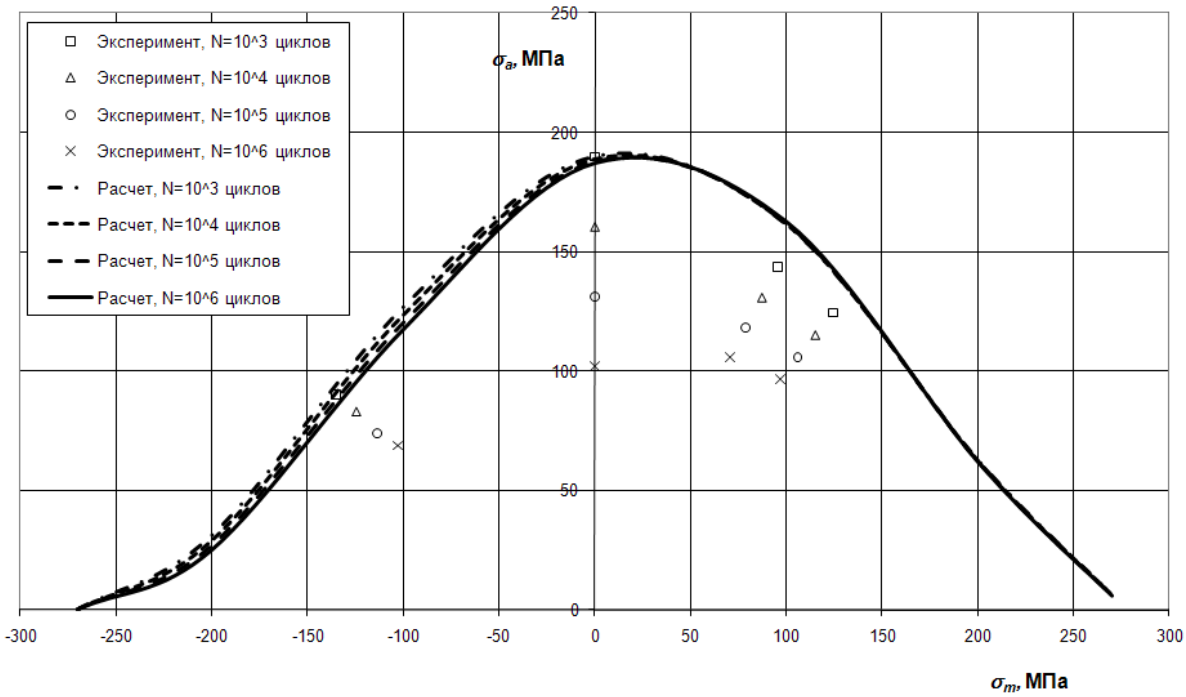


Рис. 4. Диаграмма Харриса для образцов со свободными отверстиями из ламината углепластика типа AS4-PW (использованы данные работы [13])

Fig. 4. Harris diagram for CFRP AS4-PW open-hole specimens (data from [13] were used)

обозначенный как *критическая S–N* кривая усталости. Критический коэффициент асимметрии R для этой кривой определяется как

$$R = \chi = \frac{\sigma_{UCS}}{\sigma_{UTS}}.$$

Формирование диаграммы основано на трех основных допущениях.

1. Амплитуда напряжения σ_a для данного постоянного значения усталостной долговечности N является наибольшей при критическом значении R для критической S–N кривой усталости.

2. Форма кривых диаграммы постоянной усталостной долговечности постепенно меняется от прямой к параболе с увеличением усталостной долговечности.

3. Диаграмма ограничена огибающей статического разрушения, т. е. двумя прямыми линиями, соединяющими предельное растягивающее и предельное сжимающее напряжения с максимальным значением σ_a критической S–N кривой усталости.

Формирование диаграммы зависит от положения среднего напряжения σ_m на плоскости (σ_m – σ_a), т. е. находится ли среднее напряжение в области растяжения или сжатия. Математическое выражение диаграммы можно представить следующим образом:

$$\frac{\sigma_a^{\chi} - \sigma_a}{\sigma_a^{\chi}} = \begin{cases} \left(\dfrac{\sigma_m - \sigma_m^{\chi}}{\sigma_{UTS} - \sigma_m^{\chi}} \right)^{(2-\psi_{\chi})}, & \sigma_{UTS} \geq \sigma_m \geq \sigma_m^{\chi}, \\ \left(\dfrac{\sigma_m - \sigma_m^{\chi}}{\sigma_{UTS} - \sigma_m^{\chi}} \right)^{(2-\psi_{\chi})}, & \sigma_{UCS} \leq \sigma_m \leq \sigma_m^{\chi}, \end{cases} \quad (3)$$

где σ_a^{χ} и σ_m^{χ} представляют амплитуду и среднее значение циклических напряжений при заданном значении усталостной долговечности N при усталостном нагружении с критиче-

ским значением коэффициента R; ψ_χ обозначает *коэффициент критической усталостной прочности* и определяется как:

$$\psi_\chi = \frac{\sigma^\chi_{\max}}{\sigma_B}, \qquad (4)$$

где $\sigma^\chi_{\max}$ – максимальное циклическое напряжение при заданном значении усталостной долговечности N при усталостном нагружении с критическим значением коэффициента R. $\sigma_B (\triangleright 0)$ – так называемая справочная прочность материала (абсолютный максимум между σ_{UTS} и σ_{UCS}), которая определяется как пик огибающей статического разрушения. Очевидно, что ψ_χ всегда изменяется в диапазоне [0, 1] и экспоненты $(2 - \psi_\chi)$ в уравнении (3) всегда больше единицы. Впоследствии, линейная (когда $2 - \psi_\chi = 1$) или параболическая (когда $2 - \psi_\chi \triangleright 1$) кривые могут быть получены из уравнения (3).

Коэффициент критической усталостной прочности (см. уравнение (4)) связан с числом циклов нагружения, определяемым с использованием критической S–N кривой усталости:

$$\psi_\chi = f(2N_f).$$

После определения критической S–N кривой усталости путем обработки имеющихся данных по усталости рассматриваемого слоистого ПКМ с использованием значений пределов статической прочности σ_{UTS} и σ_{UCS} может быть построена диаграмма постоянной усталостной долговечности. Очевидно, что зависимость анизоморфной ДПУД от критической S–N кривой усталости ограничивает ее применимость. Когда не известна критическая S–N кривая усталости с критическим значением коэффициента асимметрии R, может быть использована кривая усталости со значением R, которое наиболее близко к критическому значению [11].

Для повышения эффективности использования исходной анизоморфной диаграммы предложена модифицированная анизоморфная диаграмма [11]. Авторы работ [7–9] заметили, что усталостное поведение матрично-доминантных углепластиков не может быть описано простыми линиями или изогнутыми кривыми между σ_{UTS} и амплитудами критической S–N кривой усталости. Поэтому они предложили использование другой S–N кривой усталости, которую обозначали как «подкритическую» S–N кривую усталости. Использование «подкритической» S–N кривой усталости было предложено с целью разделения секторов между пределами статической прочности σ_{UTS} и σ_{UCS} и критической S–N кривой усталости, что более точно соответствует поведению слоистого ПКМ. Модифицированная анизоморфная диаграмма Каваи оказалась более точным инструментом моделирования усталостного поведения материала, но ее применимость оказалась ограниченной исследуемым материалом и такая диаграмма не может быть обобщена без дополнительных экспериментальных данных.

Тем не менее, по данным работ [1–2, 7–12] с использованием анизоморфных диаграмм Каваи может быть достигнута достаточно высокая точность результатов расчетных оценок. Этот факт можно считать основным достоинством диаграмм.

К основным недостаткам диаграмм Каваи можно отнести следующие.

1. Определенная уникальность исходных данных, требуемых для построения диаграмм. Это касается, прежде всего, необходимости построения критической S–N кривой усталости с критическим значением коэффициента асимметрии R циклического нагружения.

2. Достаточная сложность использования основного математического выражения (3) для построения диаграмм.

3. Неприемлемая точность результатов расчетных оценок с использованием приближенных методов построения диаграмм Каваи в соответствии с рекомендациями работы [1] – см. рис. 5.

В табл. 2 приведены результаты обзора основных положений рассмотренных ДПУД.

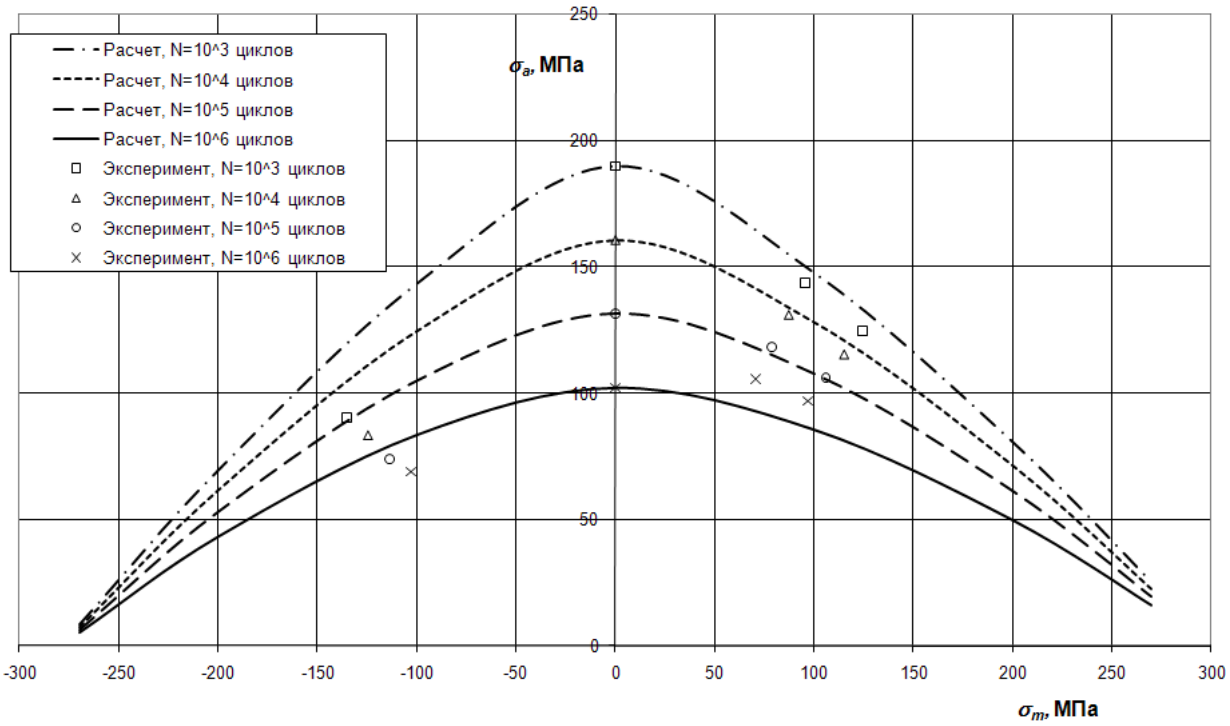


Рис. 5. Диаграмма Каваи для образцов со свободными отверстиями из ламината углепластика типа AS4-PW (использованы данные работы [13])

Fig. 5. Kawai diagram for CFRP AS4-PW open-hole specimens (data from [13] were used)

Таблица 2

Обзор основных положений различных моделей ДПУД

An overview of the key points of various constant-life diagram models

Тип ДПУД	Точность расчетных оценок	Трудоемкость (сложность) применения	Необходимые исходные данные	Рекомендации о применении
Несимметричная диаграмма Гудмана	Неустойчивая	Небольшая	σ_{UTS}, σ_{UCS}, *S-N* кривая при $R = -1$	Рекомендуется при $\sigma_m < 0$
Нелинейная несимметричная диаграмма Гербера	Неприемлемая	Небольшая	σ_{UTS}, σ_{UCS}, *S-N* кривая при $R = -1$	Не рекомендуется
Колоколообразная диаграмма Харриса	Неустойчивая	Небольшая	σ_{UTS}, σ_{UCS},	В исходном виде рекомендуется применять с осторожностью
Анизоморфные диаграммы Каваи	Высокая (по данным работ [1–2, 7–12])	Достаточно высокая	σ_{UTS}, σ_{UCS}, критическая *S-N* кривая усталости при $R = \chi$; 1 – «подкритические» *S-N* кривые усталости	Не рекомендуется при инженерных расчетах

Модификация основного математического выражения колоколообразной диаграммы Харриса

По результатам обзора и анализа представленных моделей ДПУД можно сделать вывод, что наиболее перспективной модификацией какой-либо модели ДПУД в плане достижения точности расчетных оценок при приемлемой трудоемкости может являться модификация колоколообразной диаграммы Харриса.

В качестве основы такой модификации предлагается введение в математическое выражение диаграммы Харриса (уравнение (1)) параметров специальной кривой усталости рассматриваемого ПКМ при заданной усталостной долговечности. В этом смысле модификация будет в чем-то схожей с анизоморфными диаграммами Каваи.

В качестве такой специальной кривой усталости может быть предложена кривая усталости рассматриваемого слоистого ПКМ при циклическом нагружении симметричным циклом, т. е. при $R = -1$. Предполагается, что введение параметров этой кривой в математическое выражение диаграммы Харриса обеспечит повышение точности расчетных оценок по сравнению с применением исходной диаграммы Харриса.

Математически модификация колоколообразной диаграммы Харриса состоит в следующем.

Запишем соотношение (1,а) для симметричного цикла нагружения:

$$\sigma_a^{R=-1} = f \cdot \sigma_{UTS}^{1-u-\nu} \cdot \sigma_{UTS}{}^{u} \cdot \left|\sigma_{UCS}\right|^{\nu}.$$

Тогда

$$f = \sigma_a^{R=-1} / (\sigma_{UTS}^{1-u-\nu} \cdot \sigma_{UTS}{}^{u} \cdot \left|\sigma_{UCS}\right|^{\nu}). \qquad (5)$$

Подставляя уравнение (5) в соотношение (1,а), получаем:

$$\sigma_{a\,i} = \frac{\sigma_a^{R=-1} \cdot (\sigma_{UTS} - \sigma_{m\,i})^{u} \cdot (\left|\sigma_{UCS}\right| + \sigma_{m\,i})^{\nu}}{\sigma_{UTS}{}^{u} \cdot \left|\sigma_{UCS}\right|^{\nu}} \qquad (6)$$

или

$$\sigma_a^{R=-1} = \frac{\sigma_{a\,i} \cdot \sigma_{UTS}^{u} \cdot \left|\sigma_{UCS}\right|^{\nu}}{(\sigma_{UTS} - \sigma_{m\,i})^{u} \cdot (\left|\sigma_{UCS}\right| + \sigma_{m\,i})^{\nu}}. \qquad (7)$$

С целью практического использования соотношений (6)–(7) очевидна необходимость получения *средних значений* параметров u и ν, единых для всего диапазона «рабочих» долговечностей $N = 10^3 \div 10^6$. В качестве таких значений по результатам обработки данных табл. 1 можно рекомендовать следующие: $u = 2{,}18$; $\nu = 2{,}40$.

На рис. 6 представлена модифицированная диаграмма Харриса, построенная с использованием соотношения (6) для образцов со свободными отверстиями из ламината углепластика типа AS4-PW. При построении диаграммы использованы экспериментальные данные работы [13], в том числе кривая усталости для рассматриваемых образцов при коэффициенте асимметрии $R = -1$ циклического нагружения.

По результатам анализа данных, представленных на рис. 6, можно сделать следующие основные выводы.

1. Модифицированная диаграмма Харриса сохранила основное достоинство оригинальной диаграммы – колоколообразность и асимметричность формы.

2. Известно, что существует значительный разброс усталостных характеристик слоистых ПКМ. Тем не менее, можно отметить достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений модифицированной диаграммы Харриса, что позволяет надеяться на приемлемую точность расчетных оценок с использованием этой диаграммы.

Основное практическое значение предложенной диаграммы заключается в следующем.

1. При построении предложенной диаграммы удается избежать неоднозначных определений значений параметра f (см. выражения (1) и (1,а)) с использованием соотношений (2) и (2,а).

2. С использованием соотношения (6) возможно построение кривых усталости для рассматриваемого слоистого ПКМ практически с любой асимметрией циклического нагружения. Процедура построения заключается в следующем:

- предполагается, что известна кривая усталости рассматриваемого слоистого ПКМ при коэффициенте асимметрии $R = -1$ циклического нагружения;

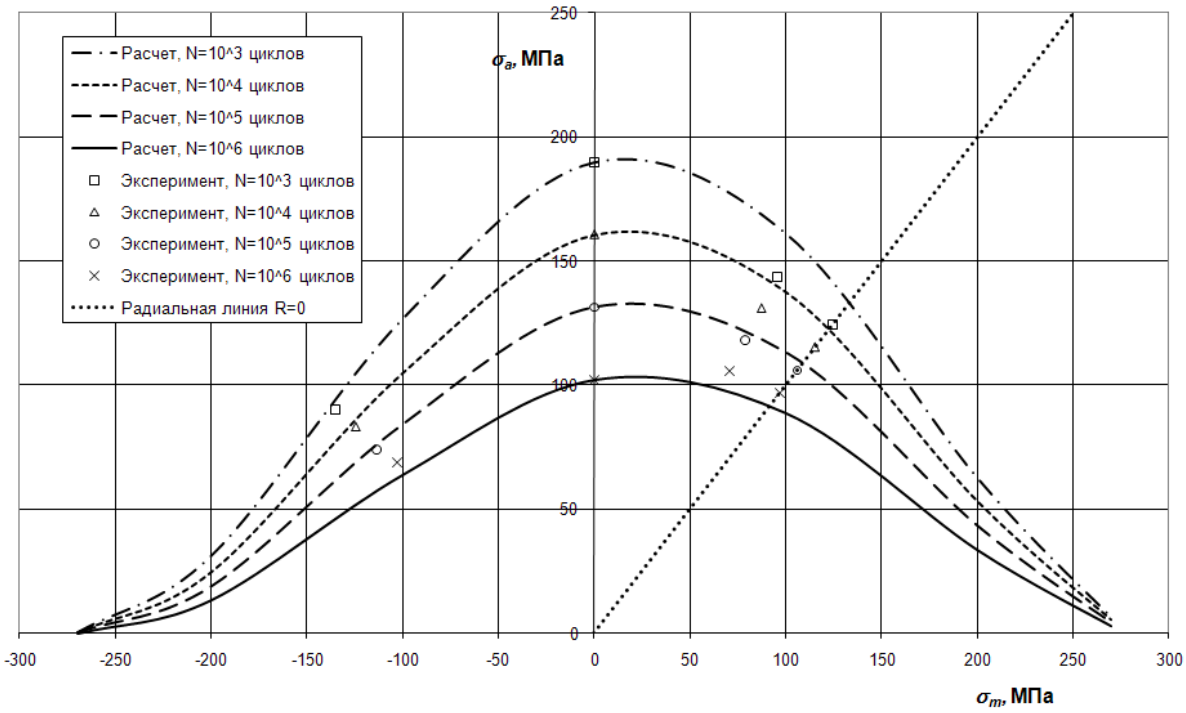


Рис. 6. Модифицированная диаграмма Харриса для образцов со свободными отверстиями из ламината углепластика типа AS4-PW (использованы данные работы [13])

Fig. 6. Modified Harris diagram for CFRP AS4-PW open-hole specimens (data from [13] were used)

• задаются определенные значения усталостной долговечности N рассматриваемого слоистого ПКМ, фиксируются значения $\sigma_a^{R=-1}$, соответствующие этой долговечности; с использованием соотношения (6) строится модифицированная диаграмма Харриса (см. рис. 6);

• задается требуемое значение коэффициента асимметрии R; на модифицированной диаграмме строится радиальная линия (см. рис. 6):

$$\sigma_a = \left(\frac{1-R}{1+R}\right)\cdot\sigma_m;$$

• определяются значения (N, σ_m, σ_a) в точках пересечения модифицированной диаграммы и радиальной линии;

• для заданного значения коэффициента асимметрии R строится кривая усталости $N = f(\sigma_{max})$, где $\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a$;

• построенная кривая усталости может использоваться для непосредственной оценки усталостной долговечности рассматриваемого ПКМ при заданном значении коэффициента асимметрии R.

3. С использованием соотношения (7) для рассматриваемого ПКМ возможен пересчет циклов с произвольной асимметрией в эквивалентные симметричные циклы нагружения.

Обсуждение результатов

Основная особенность модифицированной диаграммы Харриса состоит в том, что она построена с использованием экспериментально полученной кривой усталости рассматриваемого слоистого ПКМ при коэффициенте асимметрии $R = -1$ циклического нагружения. Эта особенность является главным отличием модифицированной диаграммы от оригинальной. Вместе с тем представляется, что использование именно этой характеристики позволит обеспечить повышение точности расчетных оценок характеристик усталости при использовании этой диаграммы.

Как правило, кривая усталости рассматриваемого слоистого ПКМ при коэффициенте асимметрии $R = -1$ циклического нагружения входит в число известных исходных данных для оценки характеристик усталости рассматриваемого слоистого ПКМ. В этом смысле она выгодно отличается от обязательного знания *критической* $S-N$ кривой усталости при критическом коэффициенте асимметрии $R = \chi$ основной диаграммы Каваи, для построение которой требуется проведение специального эксперимента.

В работе [14] представлен пример использования соотношения (7) при расчетных оценках усталостной долговечности образцов со свободным отверстием из ламината углепластика типа T300/5208 $[45/0/-45/90]_{2s}$ при квазислучайном программном нагружении. В работе [15] соотношение (7) использовано при расчетных оценках остаточной прочности образцов со свободным отверстием из ламината углепластика типа AS4/3501-6 $[0/\pm45/90]_{s4}$ при сложном многоступенчатом нагружении. В указанных работах показана удовлетворительная точность выполненных расчетных оценок.

Заключение

Представлен обзор и краткий анализ четырех известных моделей ДПУД, наиболее часто встречаемых в научных публикациях. Отмечены основные достоинства и недостатки перечисленных моделей.

В качестве определенной альтернативы рассмотренных диаграмм для инженерных расчетов усталостных характеристик слоистых ПКМ при различных коэффициентах асимметрии R циклического нагружения предложена специальная модификация диаграммы Харриса.

На примере построения предложенной диаграммы для образцов со свободными отверстиями из ламината углепластика типа AS4-PW показано, что с ее использованием возможно выполнение подобных расчетов с достаточно высокой точностью и приемлемой трудоемкостью.

С использованием предложенной диаграммы возможно построение кривых усталости для рассматриваемого слоистого ПКМ практически с любой асимметрией циклического нагружения. Подобные кривые усталости могут быть использованы в дальнейших расчетах характеристик сопротивления усталости слоистых ПКМ.

В качестве рекомендации для дальнейших исследований следует отметить необходимость увеличения объема верификации предложенной модифицированной диаграммы Харриса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Kawai M.** Fatigue life prediction of composite materials under constant amplitude loading, Fatigue life prediction of composites and composite structures. Ed. by Anastasios P. Vassilopoulos. Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2010.

[2] **Vassilopoulos A.P., Keller T.** Fatigue of Fiber-reinforced Composites, Springer-Verlag London Limited, 2011.

[3] **Harris B.** A parametric constant-life model for prediction of the fatigue lives of fiber-reinforced plastics, Fatigue in composites / ed. by B. Harris. Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2003.

[4] **Harris B., Gathercole N., Lee J.A., Reiter H., Adam T.** Life prediction for constant-stress fatigue in carbon-fiber composites // Phil Trans Roy Soc (Lond), A355. 1997. P. 1259–1294.

[5] **Beheshty M.H., Harris B., Adam T.** An empirical fatigue-life model for high-performance fiber composites with and without impact damage // Compos A: Appl Sci & Manuf., A30. 1999. P. 971–987.

[6] **Beheshty M.H., Harris B.** A constant life model of fatigue behavior for carbon fiber composites: the effect of impact damage // Compos. Sci. Technol. 1998. 58(1). P. 9–18.

[7] **Kawai M., Itoh N.** A failure-mode based anisomorphic constant life diagram for a unidirectional carbon/epoxy laminate under off-axis fatigue loading at room temperature // Journal of Composite Materials, 48 (2014) 571–592.

[8] Kawai M., Yano K., Anisomorphic constant fatigue life diagrams of constant probability of failure and prediction of P–S–N curves for unidirectional carbon/epoxy laminates // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2016. 83. P. 323–334.

[9] **Kawai M., Yano K.** Probabilistic anisomorphic constant fatigue life diagram approach for prediction of P–S–N curves for woven carbon/epoxy laminates at any stress ratio // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2016. 80. P 244–258.

[10] **Tofallis C.** A better measure of relative prediction accuracy for model selection and model estimation // Journal of the Operational Research Society. 2015. 66. P. 1352–1362.

[11] **Broer A.A.R.** Fatigue life prediction of carbon fibre-reinforced epoxy laminates using a single S-N curve, Master of Science Thesis, Delft University of Technology, 2018.

[12] **Buimovich Y., Elmalich D.** Examination of the KAWAI CLD Method for Fatigue Life Prediction of Composites // 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, ICAF 2019, Krakow, Poland, June 2–7 2019, Proceedings, Krakow, 2019.

[13] **Tomblin J., Seneviratne W.** Determining the Fatigue Life of Composite Aircraft Structures Using Life and Load-Enhancement Factors, Report DOT/FAA/AR-10/6, 2011.

[14] **Strizhius V.** Fatigue life prediction of CFRP laminate under quasi-random loading // 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, ICAF 2019, Krakow, Poland, June 2–7 2019, Proceedings, Krakow, 2019.

[15] **Стрижиус В.Е.** Расчетная оценка остаточной прочности слоистых композитов при многоступенчатом нагружении // Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций: материалы докладов третьей междунар. конф., г. Москва, 23–25 октября 2018 г. М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2018. С. 138–140.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

СТРИЖИУС Виталий Ефимович – *доктор технических наук профессор Национального исследовательского университета «МАИ»*
E-mail: vitaly.strizhius@gmail.com

Статья поступила в редакцию: 10.09.2019

REFERENCES

[1] **M. Kawai,** Fatigue life prediction of composite materials under constant amplitude loading, Fatigue life prediction of composites and composite structures. Ed. by Anastasios P. Vassilopoulos. Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2010.

[2] **A.P. Vassilopoulos, T. Keller,** Fatigue of Fiber-reinforced Composites, Springer-Verlag London Limited, 2011.

[3] **B. Harris,** A parametric constant-life model for prediction of the fatigue lives of fiber-reinforced plastics, Fatigue in composites. Ed. by B. Harris. Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, 2003.

[4] **B. Harris, N. Gathercole, J.A. Lee, H. Reiter, T. Adam,** Life prediction for constant-stress fatigue in carbon-fiber composites, Phil Trans Roy Soc (Lond), A355 (1997) 1259–1294.

[5] **M.H. Beheshty, B. Harris, T. Adam,** An empirical fatigue-life model for high-performance fiber composites with and without impact damage, Compos A: Appl Sci & Manuf., A30 (1999) 971–987.

[6] **M.H. Beheshty, B. Harris,** A constant life model of fatigue behavior for carbon fiber composites: the effect of impact damage, Compos. Sci. Technol., 58 (1) (1998) 9–18.

[7] **M. Kawai, N. Itoh,** A failure-mode based anisomorphic constant life diagram for a unidirectional carbon/epoxy laminate under off-axis fatigue loading at room temperature, Journal of Composite Materials, 48 (2014) 571–592.

[8] **M. Kawai, K. Yano,** Anisomorphic constant fatigue life diagrams of constant probability of failure and prediction of P–S–N curves for unidirectional carbon/epoxy laminates, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 83 (2016) 323–334.

[9] **M. Kawai, K. Yano,** Probabilistic anisomorphic constant fatigue life diagram approach for prediction of

P–S–N curves for woven carbon/epoxy laminates at any stress ratio, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 80 (2016) 244–258.

[10] **C. Tofallis,** A better measure of relative prediction accuracy for model selection and model estimation, Journal of the Operational Research Society, 66 (2015) 1352–1362.

[11] **A.A.R. Broer,** Fatigue life prediction of carbon fibre-reinforced epoxy laminates using a single S-N curve, Master of Science Thesis, Delft University of Technology, 2018.

[12] **Y. Buimovich, D. Elmalich,** Examination of the KAWAI CLD Method for Fatigue Life Prediction of Composites, 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, ICAF 2019, Krakow, Poland, June 2–7 2019, Proceedings, Krakow, 2019.

[13] **J. Tomblin, W. Seneviratne,** Determining the Fatigue Life of Composite Aircraft Structures Using Life and Load-Enhancement Factors, Report DOT/FAA/AR-10/6 (2011).

[14] **V. Strizhius,** Fatigue life prediction of CFRP laminate under quasi-random loading, 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, ICAF 2019, Krakow, Poland, June 2–7 2019, Proceedings, Krakow, 2019.

[15]**V.E. Strizhius,** Estimation of the residual strength of layered composites under multistage loading, Third International Conference DFCMS-2018, IMASH, Moscow, 23–25 October 2018, Proceedings, Moscow, 2018.

THE AUTHOR

STRIZHIUS Vitalii E. – *National research university «Moscow Aviation Institute»*
E-mail: vitaly.strizhius@gmail.com

Received: 10.09.2019

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019

DOI: 10.18721/JEST.25312
УДК 546.3

А.Г. Морачевский, А.А. Попович

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

МАГНИЙ-ИОННЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ – НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

В 1990–1991 гг. рядом фирм Японии, США, других стран началось крупномасштабное производство литий-ионных аккумуляторов, в основе которых лежат процессы внедрения (интеркаляции) ионов лития в различные анодные и катодные материалы. Первоначально в качестве анодов служили углеродные материалы со слоистой структурой. В XXI веке опубликовано огромное число исследований, направленных на изучение более эффективных анодных материалов для последующих поколений литий -ионных аккумуляторов, преимущественно на основе кремния, олова, ряда других металлов и сплавов. Достигнут прогресс и в получении более дешевых катодных материалов. Начиная с 2010–2012 гг. опубликовано большое число экспериментальных исследований и обобщающих работ с рекомендациями перезаряжаемых химических источников тока (ХИТ) на основе интеркаляции ионов натрия. Основное преимущество натрий-ионных аккумуляторов заключается в широкой доступности и дешевизне соединений натрия. Природные запасы литийсодержащих руд относительно не велики. Позднее, в последние годы (начиная с 2012 г.) проявляется устойчивый интерес к магний-ионным батареям, к процессам интеркаляции ионов магния.

Ключевые слова: магний-ионные аккумуляторы, гибридные аккумуляторы, анодные и катодные материалы для магний-ионных аккумуляторов.

Ссылка при цитировании:
А.Г. Морачевский, А.А. Попович. Магний-ионные аккумуляторы – новое направление исследований // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 3. С. 133–139. DOI: 10.18721/JEST.25312

A.G. Morachevskij, A.A. Popovich

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

MAGNESIUM BATTERIES: A NEW DIRECTION OF RESEARCH

A number of companies in Japan, the USA and other countries began large-scale production of lithium-ion batteries in 1990-1991, based on incorporation (intercalation) of lithium ions into various anode and cathode materials. Initially, carbon materials with a layered structure served as anodes. In the 21st century, a huge number of studies have been published aimed at studying more efficient anode materials for subsequent generations of lithium-ion batteries, mainly based on silicon, tin, and a number of other metals and alloys. Progress has also been made in obtaining cheaper cathode materials. Starting from 2010–2012, a large number of experimental studies and generalizing works have been published with recommendations for rechargeable chemical current sources (CIT) based on intercalation of sodium ions. The main advantage of sodium-ion batteries is wide availability and low cost of sodium compounds. The natural reserves of lithium-containing ores are relatively small. Later, in recent years (since 2012), a steady interest has been shown in magnesium-ion batteries and in the processes of intercalation of magnesium ions.

Keywords: magnesium-ion batteries, hybrid batteries, anode and cathode materials for magnesium-ion batteries.

Citation:
A.G. Morachevskij, A.A. Popovich, Magnesium batteries: a new direction of research, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 25 (03) (2019) 133–139. DOI: 10.18721/JEST.25312

Ранее нами опубликованы краткие сведения обобщающего характера относительно литий-ионных [1] и натрий-ионных [2] аккумуляторов. К числу наиболее информативных обзоров в области литий-ионных аккумуляторов относятся работы [3] (262 ссылки на оригинальные статьи) и [4] (331 ссылка). Ситуация с обзорными работами, касающимися натрий-ионных аккумуляторов рассмотрена нами ранее [2]. К наиболее информативным относятся обзоры [5] (643 ссылки) и [6] (584 ссылки).

Термодинамическому обоснованию выбора анодных материалов для литий-ионных и натрий-ионных аккумуляторов посвящены монографии [7, 8].

Каждый из этих двух видов ХИТ имеет свои достоинства и недостатки, они анализируются, неоднократно сопоставляются их энергетические показатели, стоимость [5, 6, 8–0]. Принято считать, что Na-ионные аккумуляторы имеют более низкие эффективность использования электродных материалов и плотность энергии по сравнению с Li-ионными. Наиболее перспективная область применения Na-ионных аккумуляторов – стационарные установки для хранения электроэнергии, где самыми важными факторами являются доступность сырья и низкая его стоимость.

Активные исследования магний-ионных аккумуляторов начались не более десяти лет назад. В опубликованном в 2019 г. обзоре Куанга с соавторами [11] (151 ссылка) суммированы экспериментальные работы в этой области, преимущественно относящиеся к 2012–2018 гг. (82 %), из рассмотренных работ 58 опубликованы в 2016–2018 гг. Хотя основное внимание в обзоре [11] уделено катодным материалам (V_2O_5, MnO_2, MoS_2, в меньшей степени TiS_2, TiO_2, сера, иод), которые являются традиционными, с точки зрения термодинамики протекающих процессов особенно интересен выбор анодных материалов, в качестве которых фигурируют прежде всего висмут, сурьма, их сплавы $Bi_{1-x}Sb_x$, олово.

В конце XX в. и в последующие годы активно изучались перезаряжаемые ХИТ с магниевым анодом, интерес к магнию всегда проявлялся. По сравнению с литием и натрием магний имеет значительно более высокую теоретическую емкость на единицу объема: у Mg она 3833 мА · ч · см$^{-3}$, у Li и Na соответственно 2061 и 1128. Удельная емкость (мА · ч · г$^{-1}$) такова: у Mg 2205, у Li 3861, у Na 1161. Ионные радиусы (нм) равны: у Mg 0,065, у Li 0,065, у Na 0,095. В обзоре Новака с соавторами [12] (135 ссылок) отмечаются большие трудности, связанные с формированием на поверхности магниевого анода при циклировании в органических растворителях пассивирующей пленки. Поведение магния в апротонных растворителях, катодные материалы для таких ХИТ, достигаемые энергетические показатели рассмотрены в работе [13] (53 ссылки). Проблем с пассивацией магниевого анода удается избежать переходом к магний-ионным аккумуляторам, основанным на тех же принципах, что Li-ионные и Na-ионные аккумуляторы: ионы магния обратимо внедряются в анодные и катодные материалы. При этом взаимодействие магния с указанными выше анодными материалами сдвигает потенциал анода в область, при которой оксиды магния не могут образовываться. В работе [14] изучены процессы интеркаляции и деинтеркаляции ионов магния (magnesiation and demagnesiation) с использованием в качестве анодов висмута, сурьмы и их сплавов. Чистые металлы, сплавы $Bi_{1-x}Sb_x$ получали методом электроосаждения. Лучшие результаты получены с чистым висмутом: после 100 циклов удельная емкость составляла 222 мА · ч · г$^{-1}$. Существенно более высокие результаты были достигнуты с использованием наноструктурированных висмутовых электродов [15]. В этом случае обратимая удельная емкость достигала 350 мА · ч · г$^{-1}$ (3430 мА · ч · см$^{-3}$). Аноды очень хорошо, с высокой эффективностью циклировались.

Динамика процессов интеркаляции ионов магния в анодах из олова или висмута с образованием соединений Mg_2Sn или Mg_3Bi_2 описана в работе [16]. Результаты исследований показали, что олово и висмут пригодны для использования их в качестве анодного материала в Mg-ионных батареях, диффузионный барьер незначителен, однако при их сравнении предпочтительнее висмут.

Группой китайских авторов [17] описана полная батарея (full cell) с анодом из наноструктурированного Mg_3Bi_2, с электролитом, не вызывающим коррозии электродных материалов, и катодом, включающим V_2O_5, MnO_2 и сложное железоцианидное соединение, известное под названием «prussian blue». Отдаваемая батареей удельная емкость при разряде током силой 0,2 А · г$^{-1}$ составляет 92 мА · ч · г$^{-1}$ с потерей емкости при циклировании 0,06 % за один цикл. Напряжение батареи около 2 В.

Нгуйен и Сонг [18] обстоятельно изучили применение станнида магния Mg_2Sn в качестве анодного материала. Теоретическая удельная емкость в этом случае составляет 64 мА · ч · г$^{-1}$ активного вещества, потенциал относительно электрода Mg / Mg^{2+} 0,2 В. Авторами подробно описано приготовление Mg_2Sn из порошков чистых компонентов. Анодный материал содержал (в мас. %): Mg_2Sn 80 %, углерода в виде сажи 7 %, углеродного волокна с удельной поверхностью 24 м^2 · г$^{-1}$ 3 %, поливинилиденфторида 10 %. Для анода разрядная емкость составляла 270 мА · ч · г$^{-1}$. В работе изучалась полная батарея с катодом на основе V_2O_5, сепаратором служило стеклянное волокно, применялись различные электролиты. Испытания проводились при комнатной температуре (22 °С), в широком интервале составов при силе тока 8 мА · г$^{-1}$.

Анодный процесс:

$$Mg_2Sn \leftrightarrow Mg_{1,5}Sn + 0,5Mg^{2+} + e$$

Катодный процесс:

$$V_2O_5 + 0,5Mg^{2+} + e \leftrightarrow Mg_{0,5}V_2O_5$$

Авторы отмечают перспективность дальнейших исследований по применению Mg-ионных аккумуляторов при комнатной температуре.

В работе [19] описана магний-ионная батарея, которая базируется целиком на органических соединениях: катодным материалом служит политрифениламин, анодный материал – перилен диимид этилен диамин, электролит – раствор перхлората магния в ацетонитриле. Батарея показала достаточную удельную емкость и хорошо циклировалась в интервале температур от +20 до –25 °С. Емкость составляла 90 мА · ч · г$^{-1}$ при силе тока 50 мА · г$^{-1}$ и уменьшалась до 73 мА · ч · г$^{-1}$ при токовой нагрузке в 1000 мА · г$^{-1}$. После 5000 зарядно-разрядных циклов и нагрузке 1000 мА · г$^{-1}$ сохранялось 88 % исходной емкости. На величину емкости влияет температура. При плотности тока 50 мА · г$^{-1}$ и температуре 25 °С, как уже отмечалось, емкость батареи 90 мА · ч · г$^{-1}$, понижение температуры до 0 °С снижает емкость до 71 мА · ч · г$^{-1}$, при –10 °С емкость 60 и при –20 °С 58 мА · ч · г$^{-1}$. При температуре 0 и –10 °С увеличение плотности тока с 50 до 500 мА · г$^{-1}$ снижает зарядно-разрядную емкость, соответственно, до 59 и 47 мА · ч · г$^{-1}$.

В последние годы появилось большое число работ, в которых изучаются так называемые «гибридные батареи», т. е. ХИТ, в которых электролит содержит как минимум два иона, участвующих в электродных реакциях. К настоящему времени из числа ХИТ такого типа наибольший интерес проявляется к батареям, электролит в которых содержит одновременно ионы Mg^{2+} и Li^+, Mg^{2+} и Na^+, Li^+ и Na^+. Появление гибридных батарей преследует прежде всего такие цели: частичная замена лития более дешевыми металлами (магнием, натрием), применение более дешевых катодных материалов, повышение энергетических характеристик батарей.

В обзоре группы авторов из США [20] (81 ссылка) рассмотрены исследования переза-

ряжаемых Mg-Li гибридных батарей. Обзор преимущественно содержит ссылки на работы, опубликованные в 2013–2016 гг. включительно (73 %). Mg-Li батареи демонстрируют возможность длительного циклирования с высокой эффективностью. Для батареи с магниевым анодом и катодом на основе Mo_6S_8 могут быть записаны следующие электродные реакции:

Отрицательный электрод (анод):

$$2Mg \leftrightarrow 2Mg^{2+} + 4e,$$

Положительный электрод (катод):

$$Mo_6S_8 + 4\,Li^+ + 4e \leftrightarrow Li_4Mo_6S_8$$

Суммарная реакция:

$$2Mg + Mo_6S_8 + 4\,Li^+ \leftrightarrow Li_4Mo_6S_8 + 2Mg^{2+}.$$

Для гибридной батареи с такими электродами ($Mg\ |\ Mo_6S_8$) после 3000 циклов снижение удельной емкости было незначительным (до 5 %). В качестве катодного материала, способного к обратимой интеркаляции лития относятся также сульфиды титана, железа. Приведем в качестве примера результаты исследования магний-литиевой гибридной батареи [21]. Работа была опубликована позднее обзора [20]. При плотности разрядного тока 100 мА · г$^{-1}$ удельная емкость составляла 195 мА · ч · г$^{-1}$ и мало изменялась при циклировании. При плотности тока 200 мА · г$^{-1}$ после 150 циклов она составляла 107 мА · ч · г$^{-1}$. При плотности тока 500 мА · г$^{-1}$ после 800 циклов емкость равнялась 75 мА · ч · г$^{-1}$. Выделения лития на аноде совместно с магнием с образованием сплава Mg-Li, как правило, не наблюдалось.

В работе [22] описана Mg-Na гибридная батарея с электролитом, содержащим ионы Mg^{2+} и Na^+, анодом из магния и с катодом из соединения $Fe[Fe(CN)_6]$, называемого berlin green (берлинская зеленая). Ячейка имела напряжение 2,2 В, обратимую емкость 143 мА · ч · г$^{-1}$ и такие энергетические характеристики: удельная энергия 135 Вт · ч · кг$^{-1}$ и удельная мощность 1,67 кВт · кг$^{-1}$. Применялся сложный электролит, содержащий $MgCl_2$ и $NaAlCl_4$. Электродные реакции можно записать следующим образом:

Отрицательный электрод (анод):

$$Mg + AlCl^-_4 \leftrightarrow 1/2[Mg_2Cl_2]^{2+} + AlCl_3 + 2e,$$

Положительный электрод (катод):

$$Fe[Fe(CN)_6] + 2Na^+ + 2e \leftrightarrow Na_2FeFe(CN)_6,$$

Суммарный процесс:

$$Fe[Fe(CN)_6] + Mg + 2NaAlCl_4 \leftrightarrow$$
$$\leftrightarrow Na_2Fe[Fe(CN)_6] + 1/2[Mg_2Cl_2][AlCl_4]_2 + AlCl_3$$

В другой работе, [23], выполненной также в США, изучалась Mg-Na гибридная батарея с более высоким напряжением (2,6 в), что достигалось применением в качестве катодного материала соединения $Na_3V_2(PO_4)_3$, анод магниевый. Протекающие электродные реакции можно представить в следующем виде:

Отрицательный электрод (анод):

$$Mg + AlCl^-_4 \leftrightarrow 1/2[Mg_2Cl_2]^{2+} + AlCl_3 + 2e,$$

Положительный электрод (катод):

$$NaV_2(PO_4)_3 + 2Na^+ + 2e \leftrightarrow Na_3V_2(PO_4)_3,$$

Суммарный процесс:

$$NaV(PO_4)_3 + 2NaAlCl_4 + Mg \leftrightarrow$$
$$\leftrightarrow Na_3V_2(PO_4)_3 + 1/2[Mg_2Cl_2][AlCl_4]_2 + AlCl_3$$

Удельная емкость такой гибридной ячейки около 100 мА · ч · г$^{-1}$ при хорошей циклируемости.

В заключение этого небольшого обзора отметим, что ХИТ, в которых используются процессы интеркаляции не будут ограничиваться литием, натрием и магнием. Уже появились работы с изучением алюминий-ионных батарей [24, 25]. В перспективе могут также создаваться перезаряжаемые источники тока с участием ионов калия или кальция.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Морачевский А.Г., Попович А.А., Демидов А.И.** Применение лития, его сплавов и соединений в химических источниках тока (к 25-летию начала производства литий-ионных аккумуляторов) // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2016. Т. 1, № 238. С. 65–79.

[2] **Морачевский А.Г., Попович А.А., Демидов А.И.** Перспективные анодные материалы для натрий-ионных аккумуляторов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 4. С. 185–195.

[3] **Nitta N., Wu F., Lee J. T., Yushin G.** Li-ion battery materials: present and future // Materials Today. 2015. Vol. 18, no. 5. C. 252–264.

[4] **Шиппер Ф., Аурбах Д.** Прошлое, настоящее и будущее литий-ионных аккумуляторов: краткий обзор // Электрохимия. 2016. Т. 52, №12. С. 1229–1258.

[5] **Hwang J.-Y., Myung S.-T., Sun Y.-K.** Sodium-ion batteries: present and future // Chem. Soc. Rev. 2017. Vol. 46. P. 3529–3614.

[6] **Скундин А.М., Кулова Т.Д., Ярославцев А.Б.** Натрий-ионные аккумуляторы // Электрохимия. 2018. Т. 54. № 2. С. 131–174.

[7] **Морачевский А.Г., Демидов А.И.** Термодинамика сплавов лития с элементами подгруппы углерода (C, Si ,Ge, Sn, Pb) / под ред. А.А. Поповича. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 151 с.

[8] **Морачевский А.Г., Демидов А.И.** Термодинамика и электрохимия сплавов сурьмы с щелочными металлами / под ред. А.А. Поповича. СПб.: Изд-во Политех-Пресс, 2018. 146 с.

[9] **Palomares V., Serras P., Villaluenga I. Hueso K.B., Carretero-Gonzalez J., Rojo T.** Na-ion batteries, recent advances and present challenges to become low cost energy storage systems // Energy Environ. Sci. 2012. Vol. 5. P. 5884–5901.

[10] **Кулова Т.Л., Скундин А.М.** От литий-ионных к натрий-ионным аккумуляторам // Электрохим. энергетика. 2016. Т. 16, № 3. С. 122–150.

[11] **Kuang C., Zeng W., Li Y.** A review of electrode for rechargeable magnesium-ion batteries // J. Nanosci. Nanotechnol. 2019. Vol. 19. P. 12–25.

[12] **Novak P., Imhof R., Haas O.** Magnesium insertion electrodes for rechargeable nonaqueous batteries – a competitive alternative to lithium? // Electrochim. Acta. 1999. Vol. 45. P. 351–367.

[13] **Aurbach D., Weissman I., Cofer Y., Levi E.** Nonaqueous magnesium electrochemistry and its application in seqondary batteries // Chem. Record. 2003. Vol. 3. P. 61–73.

[14]**Arthur T. S., Singh N., Matsui M.** Electrodeposited Bi, Sb and Bi1-xSbx alloys as anodes for Mg-ion batteries // Electrochem. Commun. 2012. Vol. 16. P. 103–106.

[15] **Shao Y., Gu M., Li X., Nie Z., Zuo P., Li G., Liu T., Xiao J., Cheng Y., Wang C., Zhang J.-G., Liu J.** Highly reversible Mg insertion in nanostructured Bi for Mg-ion batteries // Nano Lett. 2014. Vol. 14. P. 255–260.

[16] **Jin W. Li Z., Wang Z., Fu Y.Q.** Mg ion dynamics in anode materials of Sn and Bi for Mg-ion batteries // Mater. Chemistry and Physics. 2016. Vol. 182. P. 167–172.

[17] Tan Y.-H., Yao W.-T., Zhang T., Ma T., Lu L.-L., Zhou F., Yao H.-B., Yu S.-N. High voltage magnesium-ion battery enabled by nanocluster Mg3Bi2 alloy anode in noncorrosive electrolyte // ACS Nano. 2018. Vol. 12. № 6. P. 5856–5865.

[18] **Nguyen D.-T., Song S.-W.** Magnesium stannide as a high-capacity anode for Mg-ion batteries // J. Power Sources. 2017. Vol. 368. P. 11–17.

[19] **Lu D. Liu H., Huang T., Xu Z. Ma L., Yang P., Qiang P., Zhang F., Wu D.** Magnesium-ions organic secondary Battery // J. Mater. Chem. A. 2018. Vol. 6. P. 17297–17302.

[20] **Cheng Y., Chang H.J., Dong H., Choi D., Srenkle V.L. Liu J., Yao Y., Li G.** Rechargeable Mg-Li hybrid batteries: status and challenges // J. Mater. Res. 2016. Vol. 31. № 20. P. 3125–3141.

[21] **Minella C.B., Gao P., Zhao-Karget Z., Diemant T., Behm R.J., Fichtner M.** Lithium-magnesium hybrid battery with vanadium oxychloride as electrode material // Chemistry Select. 2017. Vol. 2. P. 7558–7564.

[22] **Dong H., Li Y., Liang Y., Li G., Sun C.-J., Ren Y., Lu Y., Yao Y.** A magnesium-sodium hybrid battery with high operating voltage // Chem. Commun. 2016. Vol. 52. P. 8263–8265.

[23] **Li Y., An Q., Cheng Y., Liang Y., Ren Y., Sun C.-J., Dong H., Tang Z., Li G., Yao Y.** A high-voltage rechargeable magnesium-sodium hybrid battery // Nano Energy. 2017. Vol. 34. P. 188–194.

[24] **Jayaprakash N., Das S.K., Archer L.A.** The rechargeable aluminium-ion battery // Chem. Commun. 2011. Vol. 47. P. 12610–12612.

[25] **Das S.K., Mahapatra S., Lahan H.** Aluminium-ion batteries: developments and challenges // J. Mater. Chem. A. 2017. Vol. 5. P. 6347–6357.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МОРАЧЕВСКИЙ Андрей Георгиевич – *доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*
E-mail: andrey.morachevsky@gmail.com
ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич – *доктор технических наук директор ИММиТ Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*
E-mail: popovicha@mail.ru

Статья поступила в редакцию: 22.08.2019

REFERENCES

[1] **A.G. Morachevskiy, A.A. Popovich, A.I. Demidov,** Primeneniye litiya, yego splavov i soyedineniy v khimicheskikh istochnikakh toka (k 25-letiyu nachala proizvodstva litiy-ionnykh akkumulyatorov), St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 1 (238) (2016) 65–79.

[2] **A.G. Morachevskiy, A.A. Popovich, A.I. Demidov,** Perspektivnyye anodnyye materialy dlya natriy-ionnykh akkumulyatorov, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 24 (4) (2018) 185–195.

[3] **N. Nitta, F. Wu, J.T. Lee, G. Yushin,** Li-ion battery materials: present and future, Materials Today, 18 (5) (2015) 252–264.

[4] **F. Shipper, D. Aurbakh,** Proshloye, nastoyashcheye i budushcheye litiy-ionnykh akkumulyatorov: kratkiy obzor, Elektrokhimiya, 52 (12) (2016) 1229–1258.

[5] **J.-Y. Hwang, S.-T. Myung, Y.-K. Sun,** Sodium-ion batteries: present and future, Chem. Soc. Rev. 46 (2017) 3529–3614.

[6] **A.M. Skundin, T.D. Kulova, A.B. Yaroslavtsev,** Natriy-ionnyye akkumulyatory, Elektrokhimiya, 54 (2) (2018) 131–174.

[7] **A.G. Morachevskiy, A.I. Demidov,** Termodinamika splavov litiya s elementami podgruppy ugleroda (S, Si, Ge, Sn, Rb). Pod red. A.A. Popovicha. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2016.

[8] **A.G. Morachevskiy, A.I. Demidov,** Termodinamika i elektrokhimiya splavov surmy s shchelochnymi metallami. Pod red. A.A. Popovicha. SPb.: Izd-vo Politekh-Press, 2018.

[9] **V. Palomares, P. Serras, I. Villaluenga, K.B. Hueso, J. Carretero-Gonzalez, T. Rojo,** Na-ion batteries, recent advances and present challenges to become low cost energy storage systems, Energy Environ. Sci., 5 (2012) 5884–5901.

[10] **T.L. Kulova, A.M. Skundin,** Ot litiy-ionnykh k natriy-ionnym akkumulyatoram, Elektrokhim. energetika, 16 (3) (2016) 122–150.

[11] **C. Kuang, W. Zeng, Y. Li,** A review of electrode for rechargeable magnesium-ion batteries, J. Nanosci. Nanotechnol, 19 (2019) 12–25.

[12] **P. Novak, R. Imhof, O. Haas,** Magnesium insertion electrodes for rechargeable nonaqueous batteries – a competitive alternative to lithium? Electrochim. Acta, 45 (1999) 351–367.

[13] **D. Aurbach, I. Weissman, Y. Cofer, E. Levi,** Nonaqueous magnesium electrochemistry and its application in seqondary batteries, Chem. Record, 3 (2003) 61–73.

[14] **T.S Arthur., N. Singh, M. Matsui,** Electrodeposited Bi, Sb and Bi1-xSbx alloys as anodes for Mg-ion batteries, Electrochem. Commun, 16 (2012) 103–106.

[15] **Y. Shao, M. Gu, X. Li, Z. Nie, P. Zuo, G. Li, T. Liu, J. Xiao, Y. Cheng, C. Wang, J.-G. Zhang, J. Liu,** Highly reversible Mg insertion in nanostructured Bi for Mg-ion batteries, Nano Lett, 14 (2014) 255–260.

[16] **W. Jin. Z. Li, Z. Wang, Y.Q. Fu.** Mg ion dynamics in anode materials of Sn and Bi for Mg-ion batteries, Mater. Chemistry and Physics, 182 (2016) 167–172.

[17] **Y.-H. Tan, W.-T. Yao, T. Zhang, T. Ma, L.-L. Lu, F. Zhou, H.-B. Yao, S.-N. Yu.** High voltage magnesium-ion battery enabled by nanocluster Mg3Bi2 alloy anode in noncorrosive electrolyte, ACS Nano, 12 (6) (2018) 5856–5865.

[18] **D.-T. Nguyen, S.-W. Song.** Magnesium stannide as a high-capacity anode for Mg-ion batteries, J. Power Sources, 368 (2017) 11–17.

[19] **D. Lu, H. Liu, T. Huang, Z. Xu, L. Ma, P. Yang, P. Qiang, F. Zhang, D. Wu,** Magnesium-ions organic secondary Battery, J. Mater. Chem. A. (2018) 6 17297–17302.

[20] **Y. Cheng, H.J. Chang, H. Dong, D. Choi, V.L. Srenkle, J. Liu, Y. Yao, G. Li,** Rechargeable Mg-Li hybrid batteries: status and challenges, J. Mater. Res., 31 (20) (2016) 3125–3141.

[21] **C.B. Minella, P. Gao, Z. Zhao-Karget, T. Diemant, R.J. Behm, M. Fichtner,** Lithium-

magnesium hybrid battery with vanadium oxychloride as electrode material, Chemistry Select, 2 (2017) 7558–7564.

[22] **H. Dong, Y. Li, Y. Liang, G. Li, C.-J. Sun, Y. Ren, Y. Lu, Y. Yao,** A magnesium-sodium hybrid battery with high operating voltage, Chem. Commun, 52 (2016) 8263–8265.

[23] **Y. Li, Q. An, Y. Cheng, Y. Liang, Y. Ren, C.-J. Sun, H. Dong, Z. Tang, G. Li, Y. Yao,** A high-voltage rechargeable magnesium-sodium hybrid battery, Nano Energy, 34 (2017) 188–194.

[24] **N. Jayaprakash, S.K. Das, L.A. Archer,** The rechargeable aluminium-ion battery, Chem. Commun, 47 (2011) 12610–12612.

[25] **S.K. Das, S. Mahapatra, H. Lahan,** Aluminium-ion batteries: developments and challenges, J. Mater. Chem. A., 5 (2017) 6347–6357.

THE AUTHORS

MORACHEVSKIJ Andreii G. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*
E-mail: andrey.morachevsky@gmail.com
POPOVICH Anatolii A. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*
E-mail: popovicha@mail.ru

Received: 22.08.2019

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019

DOI: 10.18721/JEST.25313
УДК 001.3

А.Г. Морачевский

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

О ИСТОРИИ ХИМИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА (1919–1930)

Кратковременное существование Химического факультета остается одной из ярких страниц в истории Политехнического института. Он был образован в 1919 г. на основе Электрохимического подотдела, входившего в состав Металлургического отделения со времени создания института и имел выдающийся преподавательский состав. На Химическом факультете (четыре специализации) работали академики Н.С. Курнаков. В.А. Кистяковский, Ф.Ю. Левинсон-Лессинг, профессора П.П. Федотьев (член-корр. АН СССР с 1933 г.), А.А. Байков (академик с 1932 г.), Д.С. Белянкин (академик с 1943 г.), известные профессора В.А. Кинд и Б.Н. Меншуткин. Лекции по физике читал академик А.Ф. Иоффе, в преподавании физики принимал участие совсем еще молодой Н.Н. Семенов. Целый ряд выпускников химического факультета внесли существенный вклад в развитие различных областей отечественной науки. Нельзя забывать, что благодаря В.А. Кистяковскому в Петербургском политехническом институте на соответствующем тому времени уровне впервые в России началось преподавание физической химии и теоретической электрохимии, были созданы первые в России лаборатории такого профиля. Политехнический институт первым в России начал выпуск инженеров по прикладной электрохимии. Ф.Ю. Левинсон-Лессинг и его ученик Д.С. Белянкин единственные в России и СССР готовили специалистов в области геохимии. Химический факультет, как и весь Политехнический институт, прекратил свое существование 30 июня 1930 г. в соответствии с приказом ВСНХ СССР.

Ключевые слова: история Петербургского политехнического института, академик Н.С. Курнаков, академик В.А. Кистяковский, академик Ф.Ю. Левинсон-Лессинг, академик А.А. Байков.

Ссылка при цитировании:
Морачевский А.Г. О истории химического факультета Политехнического института (1919–1930) // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 3. С. 140–147. DOI: 10.18721/JEST.25313

A.G. Morachevskij

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

HISTORY OF THE CHEMICAL FACULTY OF THE POLYTECHNICAL INSTITUTE (1919–1930)

The short-term existence of the Faculty of Chemistry remains one of the brightest pages in the history of the Polytechnic Institute. It was formed in 1919 on the basis of the Electrochemical Subdivision, which was part of the Metallurgical Department since the foundation of the institute and had an outstanding teaching staff.

Academicians N. Kurnakov (four specializations), V.A. Kistyakovsky, F.Yu. Levinson-Lessing, Professor P.P. Fedotiev (Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences since 1933), A.A. Baikov (Academician since 1932), D.S. Belyankin (academician since 1943), famous professors V.A. Kind and B.N. Menshutkin worked at the Faculty of Chemistry. Lectures on physics were read by academician A. F. Ioffe, while then young N.N. Semenov took part in teaching physics. A number of graduates of the Faculty of Chemistry have made a significant contribution to the development of various fields of national science. We should not forget that it was thanks to V.A. Kistyakovsky that teaching of physical chemistry and theoretical electrochemistry achieved a level corresponding to that time for the first time in Russia, the first Russian laboratories of this type were created at the St. Petersburg Polytechnic Institute. Polytechnic Institute was the first in Russia to start educating applied electrochemistry engineers. F.Yu. Levinson-Lessing and his student D.S. Belyankin are the only ones in Russia and the USSR who trained specialists in the field of geochemistry. The Faculty of Chemistry, like the entire Polytechnic Institute, ceased to exist on June 30, 1930 in accordance with the order of the USSR Supreme Economic Council.

Keywords: History of St. Petersburg Polytechnic Institute, Academician N.S. Kurnakov, Academician V.A. Kistyakovsky, Academician F.Y. Levinson-Lessing, Academician A.A. Baikov.

Citation:
A.G. Morachevskij, History of the chemical faculty of the Polytechnical institute (1919–1930), *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25 (03) (2019) 140–147. DOI: 10.18721/JEST.25313

3 октября 1902 г. начались учебные занятия в построенном по инициативе министра финансов С.Ю. Витте Санкт-Петербургском политехническом институте. Первоначально в его состав входили три технических (Кораблестроительное, Электромеханическое, Металлургическое) и Коммерческое (Экономическое) отделения. В состав Металлургического отделения входил Электрохимический подотдел.

При подготовке инженеров на Металлургическом отделении, наряду с изучением математики, физики, механики, металлургических дисциплин, значительное внимание уделялось химическим наукам – общей, аналитической и физической химии. Изучались также кристаллография и минералогия. На Электрохимическом подотделе в качестве специальных предметов изучались теоретическая и прикладная электрохимия, органическая химия, минеральная технология.

Развитию научных исследований на Металлургическом отделении, включая Электрохимический подотдел, в значительной мере способствовало то, что студенты на завершающей стадии своего образования могли выполнять либо проект, либо экспериментальную дипломную работу.

Известный физико-химик и историк химии А.Ф. Капустинский, характеризуя высшие технические школы Петербурга, писал: «...среди высших технических школ Петербурга особое место занял Политехнический институт как один из крупнейших центров химии в России начала XX века... Хотя институт выпускал не химиков, а инженеров-металлургов, химическое образование было поставлено в нем весьма высоко. В институте проведены крупные исследования» [1]. Далее отмечается, что институт получил от государства «...значительные, невиданные по тем временам средства, на которые были созданы лаборатории, превосходившие по площади и богатству оборудования лучшие лаборатории иностранных высших технических учебных заведений» [1].

Деканом Металлургического отделения и Электрохимического подотдела был приглашен известный химик, заслуженный профессор Н.А. Меншуткин (1842–1907), перед этим 39 лет работавший на Естественном отделении Физико-математического факультета Петербургского университета вместе с Д.И. Менделеевым (1834–1907) и А.М. Бутлеровым (1828–1886). Ряд лет Н.А. Меншуткин был деканом факультета в Университете. Высокий

научный авторитет и опыт административной работы, поддержка директора Института князя А.Г. Гагарина – всё это позволило в короткие сроки сформировать преподавательский коллектив Металлургического отделения. Наряду с учеными, уже имевшими широкую известность, такими как Н.С. Курнаков (1860–1941, академик с 1913 г.), В.А. Кистяковский (1865–1952, академик с 1929 г.), Ф.Ю. Левинсон-Лессинг (1861–1939, академик с 1925 г.), был приглашен ряд специалистов, обладающих большим производственным опытом [6, 7].

Наличие крупных специалистов химического профиля, большая потребность страны в инженерах-химиках позволили в 1907–1918 гг. поставить вопрос о необходимости преобразования Электрохимического подотдела в Химическое отделение с подготовкой инженеров-химиков различного профиля. На этом особенно настаивали профессора Курнаков, Кистяковский и Байков, были проведены соответствующие расчеты. Совет Политехнического института согласился с этим и возбудил ходатайство об образовании Химического факультета. Однако Министерство торговли и промышленности нашло расходы на создание Химического факультета слишком большими и ходатайство отклонило [2–4].

Вернулись к обсуждению этого вопроса в 1913 г. В планируемом Химическом отделении предполагались три специализации: электрохимические производства, органические технологии и топливо, неорганические технологии (стекло, керамика). Предполагалось, что организация Химического отделения потребует увеличения числа профессоров на 2 и числа лаборантов на 8. Планировалось принимать 80 студентов. Основная проблема заключалась в помещениях. Совет Института создал комиссию для детального рассмотрения вопроса. Далее началась Первая мировая война, рассмотрение было отложено [4].

Однако в январе 1916 г. Министерство торговли и промышленности подготовило для Государственной Думы проект об учреждении в Политехническом институте ряда новых отделений. Особое внимание было уделено Химическому отделению. Война выявила серьезные недостатки в развитии химической промышленности России. Число планируемых специализаций в Химическом отделении было увеличено до пяти, причем ни одна из них не дублировала специализации, имеющиеся в других высших учебных заведениях России. Планируемый приём на Химическое отделение – 120 человек, из них 40 – на электрохимическую специализацию. Предполагалось, что потребуется дополнительно 6 профессоров и 16 лаборантов. Самый главный расход – строительство. Сооружение пристройки к химическому корпусу площадью около 4 тысяч м^2 оценивалась в 415 тысяч рублей. Суммарный единовременный расход составлял 570500 рублей, для военного времени сумма очень внушительная. Тем не менее проект был передан в Государственную Думу, направлен в Комиссию по народному образованию. До революции законопроект об образовании Химического отделения Государственной Думой не был рассмотрен [2, 3].

Согласно принятым после Февральской революции законодательным актам отделения института переименовывались в факультеты, а подотделы – в отделения, директора институтов стали называться ректорами. Факультетам предоставлялось право открывать в своем составе новые отделения.

Принятые после Октябрьской революции по принципу «разрушим все до основания» законы, отменили сложившуюся веками систему аттестации преподавателей вузов. Были отменены все ученые степени: доктора, магистра, адъюнкта, отменено разделение преподавателей вузов на профессоров (заслуженных, ординарных, экстраординарных) и доцентов. Отменено звание приват-доцента (внештатного преподавателя). Все лица, самостоятельно ведущие преподавание, называются профессо-

рами. Таким образом профессором можно было стать, не защищая никакой диссертации, изменялась и структура советов в вузах.

На последнем заседании Совета в 1918 г. вновь возник вопрос о Химическом факультете. Более конкретную форму этот вопрос принял на заседании Совета в феврале 1919 г. Предложение было принципиально поддержано и для переработки прежних предложений в связи с изменившимися обстоятельствами была создана комиссия в составе профессоров М.А. Павлова, Б.Н. Меншуткина и Д.С. Белянкина. Проект предложения был разработан уже к ближайшему заседанию Совета (март 1919 г.), в нем полностью был обойден сложный вопрос о каком-либо строительстве, предлагалось создать Химический факультет в пределах имеющихся площадей, Комиссариат торговли и промышленности не возражал против открытия факультета с осени 1919 г.

В ведение Химического факультета перешли все кафедры химического профиля, включая кафедру минеральной технологии и технической электрохимии, кафедру геологии и минералогии. Первоначально факультет имел три отделения, на которых готовились специалисты, инженеры-химики в областях прикладной электрохимии, неорганической и органической технологий. С 1923 г. к ним добавилась специальность «геохимия». В число профессоров факультета входили Н.С. Курнаков, В.А. Кистяковский (с 1922 г.), Ф.Ю. Левинсон-Лессинг, П.П. Федотьев, А.А. Байков (с 1923 г.), Б.Н. Меншуткин, В.А. Кинд, Д.С. Белянкин [5, 6].

К началу тридцатых годов уже 10 лет руководство высшей школой осуществлял Главпрофобр (Главное управление по профессионально-техническому образованию при Народном комиссариате просвещения). Все эти 10 лет в вузах происходило непрерывное реформирование, а также менялось их руководство. За период с 1920 по 1930 гг. в Политехническом институте сменилось семь ректоров, некоторые из них никакого отношения в прошлом не имели к высшему образованию.

К началу 1930 г. Политехнический институт представлял собой крупнейший в стране технический вуз, состоящий из 11 факультетов. По состоянию на 1 февраля 1930 г. в нем обучалось 7198 студентов, из числа которых 530 студентов было на Металлургическом факультете и 618 студентов на Химическом факультете. Благодаря высокому уровню преподавания и разнообразию специальностей Химический факультет пользовался популярностью у поступающих во втуз.

Значительное внимание состоянию высшего технического образования в стране было уделено в резолюции Ноябрьского пленума ЦК ВКП(б) в 1929 г. Пленум потребовал решительного расширения и качественного улучшения производственной практики, отдавая производственному обучению 40–50 % учебного времени, потребовал расширить сеть вузов с резко выраженной специализацией по определенным отраслям промышленности с сокращенным сроком обучения (3 года), установив предельный срок обучения во всех других вузах в 4 года. Требовалось также «...довести процент рабочего ядра среди общего приёма не менее, чем до 70 %». Необходимо было «... улучшение состава студенчества, очищение втузов от враждебных элементов не в порядке кампаний, а в порядке систематического изучения и проверки состава студенчества» [4]. С 1928 г. Главпрофобр возглавлял А.Я. Вышинский. Несколько слов о нем:

Вышинский Андрей Януарьевич (1883–1954), юрист, прокурор СССР в 1933–1939 гг. Выступал государственным обвинителем на фальсифицированных политических процессах тех лет. За «успешную работу по укреплению социалистической законности» и «работу по разоблачению вредительских контрреволюционных организаций» награжден шестью орденами Ленина, в 1939 г избран академиком.

Непосредственно после Пленума Вышинский потребовал от ректоров втузов сокращения срока обучения до четырех лет, отмены дипломных проектов (и работ), переноса части теоретических курсов на непрерывную производственную практику. Академический час был увеличен до 50 минут. Приём студентов предлагается производить два раза в год. Вскоре последовали новые распоряжения: сократить срок обучения до трех лет и четырех месяцев, зачеты заменить учетом текущей успеваемости, ввести лабораторно-бригадный метод обучения, свести до минимума или исключить лекции. В том же месяце (ноябрь 1929 г.) Вышинский распорядился сократить срок обучения до трех лет [4].

В январе 1930 г. в высшей школе введено единоначалие: ректоры снова стали директорами, деканы – заведующими факультетами, советы институтов превращались в совещательные органы при директорах, они состояли из представителей профессорско-преподавательского состава, промышленных объединений, трестов, профсоюзных и студенческих организаций. Все должности в вузах перестали быть выборными, только назначаемые. При этом в Политехническом институте в 1930 г. обязанности директора временно исполнял его помощник по административно-хозяйственной работе С.А. Тункин, в прошлом партийный работник с двухклассным образованием.

31 января 1930 г. Политехнический институт в числе 27 высших технических учебных заведений был передан из ведения Главпрофобра Наркомата просвещения в ведение Главвтуза ВСНХ (Главное управление высших и средних технических учебных заведений Высшего совета народного хозяйства). Вместе с ЛПИ в Ленинграде в ведение ВСНХ были переведены Горный, Технологический и Электротехнический институты. Получила дальнейшее ускоренное развитие идея создания отраслевых вузов. Предлагалась схема, согласно которой Металлургический втуз оставался на территории ЛПИ, на базе Металлургического факультета, принимая к себе металлургические специальности из Электротехнического и Технологического институтов. Химический втуз создавался на территории Технологического института, на базе химических факультетов этого института с добавлением химических факультетов ЛПИ, Университета (частично), и Медицинского института (химико-фармацевтическая специальность). Вскоре втузы, перешедшие в ведение ВСНХ, получили указания по организации учебного процесса. Срок обучения – четыре года или менее, если это возможно, специализация, начиная с первого курса, производственная часть обучения – не менее 50 % учебного времени, отмена зачетов и дипломных проектов (работ). В учебном плане должно быть выделено 330 часов на общественные дисциплины, 150 часов на военную подготовку, 150 часов на изучение иностранного языка. Формально Политехнический институт прекратил существование 30 июня 1930 г.

Как сложилась судьба ведущих ученых Химического факультета? Н.С. Курнаков и Ф.Ю. Левинсон-Лессинг покинули Политехнический институт еще до его ликвидации. Н.С. Курнаков в 1934 г. с академическими учреждениями переехал в Москву, был директором Института общей и неорганической химии АН СССР, профессором МГУ. Ф.Ю. Левинсон-Лессинг еще в 1921 г. после смерти своего учителя профессора А.А. Иностранцева занял кафедру геологии и петрографии в Ленинградском университете. В.А. Кистяковский до переезда в Москву (1934 г.) заведовал кафедрой физический химии в Металлургическом институте. Д.С. Белянкин до 1934 г. занимал кафедру геологии и минералогии в Металлургическом институте, кафедру петрографии в образовавшемся Химико-технологическом институте. В 1934 г. с Петрографическим институтом АН переехал в Москву. П.П. Федотьев остался в Металлургическом институте, несколько изменив профиль и название кафед-

ры, она стала называться «Электрометаллургия цветных металлов». А.А. Байков продолжил работу в Металлургическом институте, уделяя основное внимание Химическому факультету Ленинградского университета. В.А. Кинд, его сотрудники и ученики составили основу кафедр силикатного профиля в Химико-технологическом институте – вяжущих веществ, керамики, стекла, физической химии силикатов. Сам В.А. Кинд возглавил кафедру технологии вяжущих веществ. Одновременно он продолжил руководство кафедрой строительных материалов одного из институтов, образовавшихся после реорганизации Политехнического института. Б.Н. Меншуткин продолжил работу в Металлургическом институте.

В заключение приведем очень краткие сведения о наиболее успешных выпускниках Химического факультета за период с 1921 по 1930 гг. (включительно):

Белов Николай Васильевич (1891–1982). Окончил Химический факультет в 1921 г. В дальнейшем – выдающийся ученый в области кристаллографии, кристаллохимии и геохимии. Академик АН СССР с 1953 г., Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской и Государственной премий, награжден многими орденами. В 1965 г. получил высшую награду Академии наук – золотую медаль имени Ломоносова [7].

Стендер Владимир Вильгельмович (1897–1970). Окончил Химический факультет в 1921 г., ученик П.П. Федотьева. Крупный специалист в области электрохимии водных растворов, профессор, член-корр. Казахской Академии наук. Автор учебника по прикладной электрохимии и ряда монографий [7].

Ушаков Сергей Николаевич (1893–1964). Окончил Химический факультет в 1921 г. Крупный специалист в области высокомолекулярных соединений, доктор технических наук, профессор, член-корр. АН СССР, основатель и директор Института высокомолекулярных соединений АН СССР (Ленинград). Дважды лауреат Государственной премии, награжден тремя орденами Ленина, имел другие награды [7].

Горбунова Ксения Михайловна (1904–1990) . Окончила Химический факультет в 1925 г., ученица В.А. Кистяковского. Доктор химических наук, профессор. Работала в Институте физической химии АН СССР в Москве. Крупный специалист в области электрокристаллизации металлов. Заслуженный деятель науки и техники РСФСР. Награждена двумя орденами Трудового Красного Знамени, медалями.

Федотьев Николай Павлович (1897–1969). Окончил Химический факультет в 1926 г., ученик своего отца П.П. Федотьева. Крупный специалист в области прикладной электрохимии, доктор технических наук, профессор. Руководитель авторского коллектива по написанию учебника прикладной электрохимии. Лауреат Государственной премии [6, 7].

Влодавец Владимир, Иванович (1893–1993). Окончил Химический факультет в 1924 г., ученик Ф.Ю. Левинсона-Лессинга и Д.С. Белянкина, геолог и вулканолог. Доктор геолого-минералогических наук, заслуженный деятель науки РСФСР. Один из основателей отечественной вулканологии. Награжден тремя орденами, медалями [8].

Хитаров Николай Иванович (1903–1985). Окончил Химический факультет в 1927 г. Один из лидеров отечественной геохимии, ученик Ф.Ю. Левинсона-Лессинга и Д.С. Белянкина. Член-корр. АН СССР. Лауреат премий АН СССР имени В.И. Вернадского, имени А.Е. Ферсмана. Награжден золотой медалью имени В.И. Вернадского, почетный член минералогических обществ ряда стран, награжден Орденом Ленина и другими орденами [8].

Немцов Марк Семенович (1900–1997). Окончил Химический факультет в 1928 г. Крупный химик-органик широкого профиля. Работал с академиком В.Н. Ипатьевым. Доктор химических наук, профессор. Лауреат премии АН СССР имени С.В. Лебедева. Лауреат Ленинской премии [7].

Валяшко Михаил Георгиевич (1907–1984). Окончил Химический факультет в 1930г., ученик Н.С. Курнакова, крупный специалист в области геохимии природных вод, доктор химических наук, профессор МГУ. Лауреат премии имени В.И. Вернадского. Награжден орденом Ленина, медалями [8, 9].

Гуськов Василий Михайлович (1902–1964). Окончил Химический факультет в 1930 г., ученик П.П. Федотьева. Крупный специалист в области электрометаллургии легких металлов. Доктор технических наук, профессор. Лауреат Государственной премии. Автор ряда монографий в области производства магния и алюминия. Награжден орденом Трудового Красного Знамени и медалями [7].

Торопов Никита Александрович (1908–1968). Окончил Химический факультет в 1930 г., ученик Д.С. Белянкина и В.А. Кинда, крупный специалист в области неорганического материаловедения. Доктор технических наук, профессор, член-корр. АН СССР. Директор Института химии силикатов АН СССР (Ленинград). Член Бюро Отделения Физикохимии и технологии неорганических материалов АН СССР. Лауреат Государственной премии. Награжден орденами Ленина, Трудового Красного Знамени, медалями [5, 7].

Щербина Владимир Витальевич (1907–1978). Окончил Химический факультет в 1930 г. Ученик Ф.Ю. Левинсона-Лессинга и Д.С. Белянкина. Крупный специалист в области геохимии радиоактивных элементов. Работал в Институте геохимии и аналитической химии АН СССР, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РСФСР. Лауреат Ленинской премии. Награжден золотой медалью имени В.И. Вернадского, двумя орденами Трудового Красного Знамени, медалями [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Капустинский А.Ф.** Очерки по истории неорганической и физической химии в России, от Ломоносова до Великой Октябрьской революции. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1949. 132 с.

[2] **Смелов В.А.** Санкт-Петербургский политехнический дореволюционный. СПб.: ООО «Береста», 2012. 620 с.

[3] **Меншуткин Б.Н.** История Санкт-Петербургского политехнического института (1899–1930). СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 508 с.

[4] **Смелов В.А.** Политехнический институт. Тридцатые годы. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 356 с.

[5] **Морачевский А.Г.** Химия и химики в Политехническом институте. Санкт-Петербург, Петроград, Ленинград. 1902–1930 гг. / под ред. Ю.С. Васильева. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 288 с.

[6] **Морачевский А.Г.** Очерки об ученых-химиках Санкт-Петербургского политехнического института. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. 140 с.

[7] **Морачевский А.Г.** Металлурги и химики – выпускники Политехнического института. Санкт-Петербург, Петроград, Ленинград. 1902–1930 гг. / под ред. Ю.С. Васильева. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 190 с.

[8] **Морачевский А.Г.** Вклад ученых Политехнического института в изучение и освоение природных богатств страны. Санкт-Петербург – Петроград – Ленинград. 1902–1930 / под ред. Ю.С. Васильева. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. 91 с.

[9] **Морачевский А.Г.** Академик Николай Семенович Курнаков и его научная школа / под ред. Ю.С. Васильева. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 99 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МОРАЧЕВСКИЙ Андрей Георгиевич – *доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*

E-mail: andrey.morachevsky@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 26.06.2019

REFERENCES

[1] **A.F. Kapustinskiy,** Ocherki po istorii neorganicheskoy i fizicheskoy khimii v Rossii, ot Lomonosova do Velikoy Oktyabrskoy revolyutsii. M.-L.: Izd-vo AN SSSR. 1949.

[2] **V.A. Smelov,** Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskiy dorevolyutsionnyy. SPb.: OOO «Beresta», 2012.

[3] **B.N. Menshutkin,** Istoriya Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo instituta (1899–1930). SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012.

[4] **V.A. Smelov,** Politekhnicheskiy institut. Tridtsatyye gody. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2008.

[5] **A.G. Morachevskiy,** Khimiya i khimiki v Politekhnicheskom institute. Sankt-Peterburg, Petrograd, Leningrad. 1902–1930 gg. Pod red. Yu.S. Vasilyeva. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012.

[6] **A.G. Morachevskiy,** Ocherki ob uchenykh-khimikakh Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo instituta. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2002.

[7] **A.G. Morachevskiy,** Metallurgi i khimiki – vypuskniki Politekhnicheskogo instituta. Sankt-Peterburg, Petrograd, Leningrad. 1902–1930 gg. Pod red. Yu.S. Vasilyeva. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013.

[8] **A.G. Morachevskiy,** Vklad uchenykh Politekhnicheskogo instituta v izucheniye i osvoyeniye prirodnykh bogatstv strany. Sankt-Peterburg – Petrograd – Leningrad. 1902–1930. Pod red. Yu.S. Vasilyeva. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2015.

[9] **A.G. Morachevskiy,** Akademik Nikolay Semenovich Kurnakov i yego nauchnaya shkola. Pod red. Yu.S. Vasilyeva. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2010.

THE AUTHOR

MORACHEVSKIJ Andreii G. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*
E-mail: andrey.morachevsky@gmail.com

Received: 26.06.2019

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019

Научное издание

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбПУ.
ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ НАУКИ**

Том 25, № 3, 2019

Учредитель – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и охраны культурного наследия
(свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-69285 от 06.04.2017 г.)

Технический секретарь – *О.А. Матенев*

Компьютерная верстка *Е.А. Корнуковой*

Телефон редакции (812) 294-22-86

E-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ
в журнале «Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки»

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием:

зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (Свидетельство о регистрации СМИ от 06.04.2017 ПИ № ФС 77-69285) и распространяется по подписке через объединенный каталог «Пресса России» (индекс 18390);

имеет международный стандартный номер сериального периодического издания (ISSN 2542-1239);

внесен Высшей аттестационной комиссией Минобразования РФ в Перечень периодических научных и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора наук и кандидата наук;

с 2009 г. входит в национальную информационно-аналитическую систему «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)»;

сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНИТИ РАН и включены в фонд научно-технической литературы (НТЛ) ВИНИТИ РАН, в международную библиографическую и реферативную базу данных ProQuest, международную наукометрическую базу Index Copernicus, Google Scholar, международную систему по периодическим изданиям «Ulrich's Periodicals Directory», представлены на платформе Web of Science в виде отдельной базы данных Russian Science Citation Index (RSCI), EBSCO, CNKI.

Журнал публикует результаты работ в следующих областях науки и техники: энергетика, электротехника, материаловедение, металлургия.

Редакция журнала соблюдает права интеллектуальной собственности и со всеми авторами научных статей заключает издательский лицензионный договор.

Публикация материалов, в том числе соискателей ученых степеней, осуществляется бесплатно.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Представление материалов

В статье должны быть кратко изложены новые и оригинальные результаты исследований, полученные авторами; следует избегать повторений, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

При написании оригинальной научной статьи и оформлении рукописи авторы должны придерживаться следующих правил.

Статья должна представлять собой описание выполненных исследований с указанием их места в соответствующей области наук и обсуждением значения выполненной работы. Рукопись должна содержать достаточное количество информации и ссылок на общедоступные источники для того, чтобы работа могла быть повторена независимо от авторов.

Название статьи должно быть кратким, но информативным. Обращаем внимание на то, что журнал издается как на русском, так и на английском языке. В связи с этим не следует использовать аббревиатуру в названии статьи.

Аннотация должна давать читателю сжатую информацию о содержании статьи, быть информативной и отражать не только основные цели статьи, но и главные результаты и выводы работы. Аннотация не является частью текста и сама по себе должна быть законченным описанием.

Ключевые слова должны отражать основную проблематику статьи; они приводятся на русском языке для русской и на английском для англоязычной версии статьи. Количество ключевых слов – не менее трех и не более семи.

Адрес для корреспонденции должен содержать фамилию автора для корреспонденции (не обязательно первого автора), его полный почтовый адрес, телефон, факс, e-mail.

При необходимости Редколлегия может потребовать представления Акта экспертизы.

Представление всех материалов осуществляется в электронном виде через личный кабинет ЭЛЕКТРОННОЙ РЕДАКЦИИ по адресу: http://journals.spbstu.ru

Статьи подаются в формате .docx (MS Word 2007–2010). Файл статьи, подаваемый через электронную редакцию, должен содержать только сам текст, без названия, списка литературы, фамилий и данных авторов. Список литературы, название статьи, вся информация об авторах задаются при подаче через электронную редакцию в отдельных полях. В тексте статьи должны быть ссылки на все источники из списка литературы. Порядковый номер источника в тексте статьи указывается в квадратных скобках.

2.2. Оформление материалов

2.2.1. Объем статей, как правило, 15–20 страниц формата А-4. Количество рисунков и фотографий (в том числе цветных) не должно превышать 4, таблиц – 3.

2.2.2. Число авторов – не более трех от одной организации и не более пяти от разных организаций. Статья должна быть подписана всеми авторами. Авторами являются лица, принимавшие участие во всей работе или ее главных разделах. Лица, участвовавшие в работе частично, указываются в сносках.

2.2.3. Статья должна содержать следующие разделы:

номер УДК в соответствии с классификатором;

фамилии авторов на русском и английском языках;

название на русском и английском языках;

аннотации – не менее 100 слов на русском и английском языках;

ключевые слова – не менее 3 и не более 7 на русском и английском языках;

введение (актуальность, краткое обоснование существующей проблемы) – 1,0–1,5 стр.;

цель работы (краткая четкая формулировка поставленной задачи);

методика проведения исследований и расчетов, включая краткую информацию об использованных приборах, методах и точности экспериментальных измерений и теоретических расчетов и т. д.