

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Глобальная ядерная безопасность

(научно-практический журнал)

ISSN 2305-414X (Print), ISSN 2499-9733 (Online)

Том 13, № 4 (49), 2023

Журнал включен в перечень ВАК РФ (988)

Группы научных специальностей:

- 1.2 Компьютерные науки и информатика
- 2.2 Электроника, фотоника, приборостроение и связь
- 2.4 Энергетика и электротехника
- 5.2 Экономика

Главный редактор:

Михаил Николаевич Стриханов, доктор физ.-мат. наук, профессор, НИЯУ МИФИ, *Российская Федерация*

Заместитель главного редактора:

Валентина Анатольевна Руденко, доктор соц. наук, профессор, НИЯУ МИФИ, *Российская Федерация*

Редакционная коллегия:

Владимир Петрович Поваров, доктор техн. наук, Нововоронежская АЭС, *Российская Федерация*

Мажын Каналинович Скаков, доктор физ.-мат. наук, профессор, Восточно-Казахстанский университет, *Казахстан*

Валентин Ефимович Шукинунов, доктор техн. наук, профессор, Центр тренажеростроения и подготовки персонала, *Российская Федерация*

Лю Дамин, профессор, Китайский институт ядерной энергетики, *Китай*

Александр Викторович Чернов, доктор техн. наук, профессор, НИЯУ МИФИ, *Российская Федерация*

Александр Прокопьевич Елохин, доктор техн. наук, профессор, НИЯУ МИФИ, *Российская Федерация*

Юрий Иванович Пимшин, доктор техн. наук, профессор, Донской государственный технический университет, *Российская Федерация*

Абдель-Монем Мохамед Эл-Батахи, Центральный металлургический научно-исследовательский институт, *Египет*

Валерий Вольфович Кривин, доктор техн. наук, профессор, НИЯУ МИФИ, *Российская Федерация*

Виктор Иванович Ратушный, доктор физ.-мат. наук, профессор, НИЯУ МИФИ, *Российская Федерация*

Андрей Александрович Сальников, канд. техн. наук, Ростовская АЭС, *Российская Федерация*

Александр Аркадьевич Лапкис, канд. техн. наук, НИЯУ МИФИ, *Российская Федерация*

Сергей Эдуардович Гокк, PhD в области технических наук, Институт производственных систем и технологий конструирования ИПК Общества Фраунгофера, *Германия*

Мария Владимировна Головки, доктор экон. наук, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, *Российская Федерация*

Наталья Михайловна Фоменко, доктор экон. наук, РЭУ им. Г.В.Плеханова, *Российская Федерация*

Александр Николаевич Шилин, доктор техн. наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет, *Российская Федерация*

Выпускающий редактор, компьютерная верстка:

Надежда Ивановна Лобковская, канд. филос. наук, НИЯУ МИФИ, *Российская Федерация*

Регистрация СМИ:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций 11 ноября 2011 года (Свидетельство ПИ № ФС77-47155 от 3.11.2011 г. – печатное издание). Первый номер журнала вышел в декабре 2011 года
Периодичность:	4 номера в год
Учредитель и издатель:	Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Адрес редакции:	115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31
Типография:	ИПС ВИТИ НИЯУ МИФИ, 347360, Россия, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94
Сайт:	https://glonucsec.elpub.ru/jour/index
Выход в свет:	21.12.2023 г.
Тираж:	300 экз.
Цена:	Свободная
Подписной индекс:	10647 (объединенный каталог «Пресса России»)



Научное издание. Знаком информационной продукции не маркируется согласно п. 2 ст. 1 ФЗ № 436-ФЗ от 29.12.2010 г

Москва

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2023

National Research Nuclear University MEPHI

Global Nuclear Safety

ISSN 2305-414X (Print), ISSN 2499-9733 (Online)

Vol. 13, No. 4, 2023

Editor-in-Chief:

Mikhail N. Strikhanov, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, MEPHI, Russian Federation

Deputy Editor-in-Chief:

Valentina A. Rudenko, Dr. Sci. (Soc.), Professor, MEPHI, Russian Federation

Editorial Staff:

Vladimir P. Povarov, Dr. Sci. (Eng.), Novovoronezh NPP, Russian Federation

Mazhin K. Skakov, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Kazakhstan

Valentin E. Shukshunov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, LLC «Simulator Center and Staff Training», Russian Federation

Liu Daming, Professor, Chinese nuclear power institute, CIAE, China

Alexandr V. Chernov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, MEPHI, Russian Federation

Yuri I. Pimshin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University, Russian Federation

Alexandr P. Elokhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, MEPHI, Russian Federation

Abdel-Monem Mohamed EI-Batahy, Dr. Philos. Central Metallurgical Research and Development Institute, Egypt

Valery V. Krivin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, MEPHI, Russian Federation

Viktor I. Ratushny, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, MEPHI, Russian Federation

Andrey A. Salnikov, Cand. Sci. (Eng.), Rostov NPP, Russian Federation

Aleksandr A. Lapkis, Cand. Sci. (Eng.), MEPHI, Russian Federation

Sergei E. Gook, PhD, Fraunhofer Institute for Production Systems and Design Technology IPK, Germany

Maria V. Golovko, Dr. Sci. (Econ.), FSBEI HE Kuban SAU, Russian Federation

Natalia M. Fomenko, Dr. Sci. (Econ.), Plekhanov Russian University of Economics, Russian Federation

Alexander N. Shilin, Dr. Sci. (Eng.), Volgograd State Technical University, Russian Federation

Executive Editor and Computer layout:

Nadezhda I. Lobkovskaya, Cand. Sci. (Philos.), MEPHI, Russian Federation

Founded in November, 2011 Reg. № FS77-47155, November, 3 2011
Quarterly
Founder and Publisher: National Research Nuclear University MEPHI
Editorial address: Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409, Russian Federation
Printing house: PPS VETI NRNU MEPHI, Lenin Street, 73/94, Rostov region, Volgodonsk, 347360, Russian Federation
Website: <https://glonucsec.elpub.ru/jour/index>
Published on: 21.12.2023 г.
The circulation is: 300 copies
The price: Is free
The subscription index is: 10647 in the catalogue «Press of Russia»



Moscow

National Research Nuclear University MEPHI, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Том 13, № 4 (49), 2023

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Высаливание америция-241 в процессе сорбции с использованием твердофазного экстрагента на основе ТОДГА

А.А. Савельев, В.И. Рачков..... 5

Сравнительный эксперимент по оценке эффективности водяного охлаждения фотоэлектрических модулей в климатических условиях Юга России

В.Г. Ильичев, Л.Х. Зайнутдинова, Е.И. Теруков, М.Ю. Михайлов..... 11

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Оперативное определение вольтамперных характеристик сварочных источников питания в атомном машиностроении

В.А. Винныйчук, Н.Н. Подрезов, Ю.В. Доронин..... 22

Обоснование получения мелкозернистой структуры сварных соединений при высокоинтенсивном импульсном воздействии на сварочный контур

С.М. Бурдаков, В.И. Ратушный, Ю.В. Заяров..... 27

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Оценка эффективной длины микротрещин, возникающих в водо-паропроводе при циклическом режиме работы парогенератора АЭС

А.П. Елохин..... 32

Оценка метода измерения параметров магнитной анизотропии для возможности контроля развития эрозионно-коррозионного износа оборудования

А.К. Адаменков, И.Н. Веселова..... 46

Анализ и оптимизация внутрикасетной неравномерности энерговыделения и выгорания топлива ВВЭР-1000

А.А. Лапкис, А.С. Старченко, Д.В. Тришечкин, И.Ю. Попова 51

КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Развитие культуры безопасности на промышленном предприятии (на примере Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск)

Т.С. Попова, В.А. Руденко, А.А. Попов, В.А. Бондаренко, Ю.А. Евдошкина..... 60

Парадигма ресурсосберегающего менеджмента в проектах предприятий машиностроительного дивизиона ГК «Росатом»

М.В. Головки, А.М. Потявин, И.А. Ухалина, А.В. Анцибор, Н.А. Ефименко, Ж.С. Рогачева..... 71

Авторский указатель номера 4 (49), 2023

80

CONTENTS

Vol. 13, No 4, 2023

NUCLEAR, RADIATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY

- Salting out of americium-241 in the sorption process using a solid-phase extractant based on TODGA
A.A. Savelev, V.I. Rachkov..... 5
- Comparative experiment on the efficiency of water cooling in photovoltaic modules in the climatic conditions of Southern Russia
V.G. Ilyichev, L.Kh. Zaynutdinova, E.I. Terukov, M.Yu. Mikhailov..... 11
-
-

DESIGN, MANUFACTURING AND COMMISSIONING OF NUCLEAR INDUSTRY EQUIPMENT

- Doronin. Operational determination of current-voltage characteristics of welding power sources in nuclear engineering
V.A. Vinnichuk, N.N. Podrezov, Yu.V. Doronin..... 22
- Justification of obtaining a fine-grained structure of welded joints under high-intensity pulsed action on the welding circuit
S.M. Burdakov, V.I. Rarushny, Y.V. Zayarov..... 27
-
-

OPERATION OF NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

- Estimation of the effective length of microcracks occurring in the water-steam pipeline at cyclic operation mode of NPP steam generator
A.P. Elokhin..... 32
- Evaluation of measuring magnetic anisotropy parameters method to monitor the development of erosion and corrosion wear of equipment
A.K. Adamenkov, I.N. Veselova..... 46
- Analysis and optimization of energy release and fuel burnup nonuniformity in the WWER-1000 fuel assembly
A.A. Lapkis, A.S. Starchenko, D.V. Trishechkin, I.Yu. Popova..... 51
-
-

SAFETY CULTURE AND SOCIAL AND ECONOMIC ASPECTS OF NUCLEAR INFRASTRUCTURE AREA DEVELOPMENT

- Safety culture development at an industrial enterprise (on the example of «Atommas» Branch of «AEM-Technologies» JSC in Volgodonsk)
T.S. Popova, V.A. Rudenko, A.A. Popov, V.A. Bondarenko, Yu.A. Evdoshkina..... 60
- Resource-saving management paradigm in projects of Rosatom State Corporation machine-building division enterprises
M.V. Golovko, A.M. Potyvin, I.A. Ukhalina, A.V. Antsibor, N.A. Efimenko, Zh.S. Rogacheva..... 71
-
-

- Author Index of 4 (49), 2023..... 80
-
-

УДК 621.039.73: 546.798.23

<https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-01>

EDN APDCTL



Высаливание америция-241 в процессе сорбции с использованием твердофазного экстрагента на основе ТОДГА

А.А. Савельев  , В.И. Рачков*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия* aasavelev@mephi.ru

Аннотация. На сегодняшний день в проекте «Прорыв» разрабатываются эффективные методы переработки облученного ядерного топлива (ОЯТ) для возвращения в топливный цикл долгоживущих радионуклидов с целью его замыкания. Одной из задач разработки замкнутого топливного цикла является переработка высокоактивных азотнокислых рафинатов PUREX-процесса. Для реализации данной задачи требуется выделение америция-241 из жидких радиоактивных отходов. При переработке и фракционировании ЖРО широко используют экстракционные и сорбционные технологии извлечения, очистки и концентрирования радионуклидов. Наибольшую эффективность и избирательность в процессах экстракции актиноидов (III) и лантаноидов (III) с редкоземельными (РЗЭ) и трансплутониевыми элементами (ТПЭ) из азотнокислых растворов переработки отработавших ядерных материалов показали экстрагенты на основе N, N, N', N' – тетраоктилдигликольамида (ТОДГА). Перед использованием твердофазного экстрагента на основе ТОДГА ионы вещества в растворе должны быть переведены в нейтральные комплексы или другие недиссоциированные соединения. Этого можно достичь путем добавления в раствор нейтральных солей, которые снижают растворимость разделяемых элементов, смещают экстракционное распределение и значительно повышают эффективность извлечения. Высаливаемое вещество извлекается в виде новой фазы – твердого осадка, жидкой или газовой фазы, причем в случае жидкостной экстракции происходит увеличение емкости экстрагента по целевому компоненту. Поэтому добавление в водную фазу солей высаливателей, для повышения ионной силы раствора увеличивает коэффициенты распределения извлекаемых веществ, что в свою очередь, повышает емкость сорбентов. Целью настоящей работы является исследования процесса высаливания америция-241 в процессе сорбции с использованием опытного модифицированного образца ТВЭКС ТОДГА в исследуемых модельных растворах ЖРО с урановым макрокомпонентом для различных содержаний NaNO_3 . В результате исследования выявлено, что наиболее высокие коэффициенты распределения при сорбции америция-241 и урана были получены в растворе с содержанием 100 г/л NaNO_3 , однако для урана этот эффект выражен значительно меньше, чем для америция-241. В процессе исследования кинетики сорбции америция-241 и урана был выявлен эффект высаливания, который подтверждается величинами равновесных концентраций америция-241 и урана в растворе в одной и той же точке времени, но с разной концентрацией NaNO_3 . Для америция-241 разница в равновесных концентрациях составила порядок в сторону ее уменьшения при увеличении концентрации NaNO_3 до 100 г/л. Использование данного эффекта позволяет получить максимальную емкость по америцию-241 в системе с урановым макрокомпонентом.

Ключевые слова: америций-241, высаливание, сорбция, ТОДГА.

Для цитирования: Савельев А.А., Рачков В.И. Высаливание америция-241 в процессе сорбции с использованием твердофазного экстрагента на основе ТОДГА. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(4):5–10. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-01>

For citation: Savelev A.A., Rachkov V.I. Salting out of americium-241 in the sorption process using a solid-phase extractant based on TODGA. *Global nuclear safety*. 2023;13(4):5-10 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-01>

Salting out of americium-241 in the sorption process using a solid-phase extractant based on TODGA

Aleksandr A. Savelev  , Valeriy I. Rachkov*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia* aasavelev@mephi.ru

Abstract. Today, the «Proryv» project is developing effective methods of reprocessing irradiated nuclear fuel (SNF) to return long-lived radionuclides to the fuel cycle to close it. One of the challenges of closed fuel cycle development is the reprocessing of highly active nitric acid raffinates from the PUREX-process. To achieve this task, it is necessary to separate americium-241 from liquid radioactive waste. When processing and fractionating liquid radioactive waste, extraction and sorption technologies for the extraction, purification and concentration of radionuclides are widely used. The highest efficiency and selectivity in the extraction processes of actinoids (III) and lanthanides (III) with rare earth elements (REE) and transplutonium elements (TPE) from nitric acid solutions of spent nuclear materials reprocessing were shown by extractants based on N, N, N', N'-tetraoctyldiglycolamide (TODGA).

Before using a solid-phase extractant based on TODGA, the ions of the substance in solution must be converted to neutral complexes or other non-dissociated compounds. This can be achieved by adding neutral salts to the solution, which reduce the solubility of the elements to be separated, shift the extraction distribution and significantly increase the extraction efficiency. The extracted substance is extracted in the form of a new phase - solid precipitate, liquid or gas phase, and in the case of liquid extraction there is an increase in the capacity of the extractant for the target component. Therefore, the addition of salts-salting agents to the aqueous phase to increase the ionic strength of the solution increases the distribution coefficients of extracted substances, which in turn increases the capacity of sorbents. The purpose of this work is to study the process of salting out of americium-241 during sorption using an experimental modified sample of solid-phase extractant based on TODGA in the studied model solutions of liquid radioactive waste with a uranium macrocomponent for different NaNO_3 contents. The study revealed that the highest distribution coefficients for the sorption of americium-241 and uranium were obtained in a solution containing 100 g/l NaNO_3 , but for uranium this effect is much less pronounced than for americium-241. During the study of the sorption kinetics of americium-241 and uranium, the salting effect was revealed, which is confirmed by the values of the equilibrium concentrations of americium-241 and uranium in solution at the same time point but with different NaNO_3 concentrations. The difference in the equilibrium concentrations for americium-241 was an order of magnitude towards its decrease when NaNO_3 concentration was increased up to 100 g/litre. The use of this effect makes it possible to obtain the maximum capacity for americium-241 in the system with uranium macrocomponents.

Keywords: americium-241, salting out, sorption, TODGA.

Введение

На сегодняшний день в проекте «Прорыв» разрабатываются эффективные методы переработки облученного ядерного топлива (ОЯТ) для возвращения в топливный цикл долгоживущих радионуклидов с целью его замыкания [1-3]. Одной из задач разработки замкнутого топливного цикла является переработка высокоактивных азотнокислых рафинатов PUREX-процесса [4-6]. Для реализации данной задачи требуется выделение наиболее радиоактивных минорных актинидов – америция-241 и юрия-244, которые образуются при работе реактора и находятся в облученном топливе [5, 7]. Основные изотопы юрия имеют короткий период полураспада и обладают высокой радиоактивностью, в том числе нейтронную, что значительно повышает радиоактивность ядерного топлива при возвращении его в реактор для трансмутации, затрудняя его производство и переработку. Поэтому, желательно извлекать юрий из облученного топлива при переработке и хранить его в течении 50–100 лет, возвращая в реактор продукты его распада – изотопы плутония и долгоживущий юрий. Америций-241 необходимо выделять из ОЯТ по нескольким причинам. Во-первых, это высокотоксичный и долгоживущий элемент с периодом полураспада 432,6 года (распадается в нептуний-237 с периодом полураспада более 2,2 миллиона лет). Во-вторых, при хранении ОЯТ с америцием-241 растет его альфа-активность (за счет распада плутония-241 с периодом полураспада около 14 лет). В заключении следует отметить, что америций-241 проявляет химические свойства как редкоземельные элементы (РЗЭ), которых в облученном топливе довольно много (лантан, церий, неодим и др.). Выделение минорных актинидов позволит осуществлять трансмутацию в реакторах IV поколения с получением короткоживущих радионуклидов или стабильных элементов [8]. Концепция выделения минорных актинидов позволит существенно сократить суммарную активность ОЯТ в долгосрочной перспективе. Однако разделение америция, юрия и лантаноидов – сложная задача, поскольку химические свойства этих элементов очень похожи [9].

В проекте «Прорыв» реализуется комплексный подход к переработке высокоактивных отходов, т.е.

фракционирование – выделение в одном цикле переработки сразу нескольких групп схожих по химическим, одинаковым/однородным физическим свойствам радионуклидов. При переработке и фракционировании жидких радиоактивных отходов (ЖРО) широко используют экстракционные и сорбционные технологии извлечения, очистки и концентрирования радионуклидов [10-13]. Наибольшую эффективность и избирательность в процессах экстракции актиноидов (III) и лантаноидов (III) с редкоземельными (РЗЭ) и трансплутониевыми элементами (ТПЭ) из азотнокислых растворов переработки отработавших ядерных материалов показали экстрагенты на основе N, N, N', N' – тетраоктилдигликольамида (ТОДГА) [14-18]. Структура ТОДГА представлена на рисунке 1.

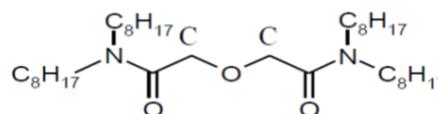


Рисунок 1. Структура N, N, N', N' – тетраоктилдигликольамида (ТОДГА)

Figure 1. Structure of N, N, N', N' – tetraoctyldiglycolamide (TODGA)

Тем не менее, у экстрагентов имеются существенный недостаток – низкая емкость из-за образования третьей фазы в растворе и физический унос экстрагента. Одним из способов исключения этих недостатков является иммобилизация экстрагента на твердом пористом носителе (грануле), что также упрощает аппаратное оформление и существенно снижает расход экстрагента. Однако в результате стабилизации поверхности раздела фаз в гранулах пористого материала и увеличении диффузионных затруднений несколько замедляется скорость экстракции металлов. Во многих случаях так называемая «гранульная» экстракция оказывается эффективной при извлечении металлов из сложных растворов благодаря возможности широкого варьирования типа матрицы, состава экстрагента в гранулах и способа его введения в твердый носитель. Эти параметры позволяют подобрать благоприятные условия экстракции металлов. Полученные результаты исследований применения ТОДГА привели к созданию твердофазных экстрагентов

(ТВЭКС), получаемых с помощью полимеризации мономеров в присутствии экстрагента. При изготовлении ТВЭКСа тип мономера и содержание экстрагента оказывают решающее влияние на размер, количество и характер расположения микроячеек, содержащих экстрагент, степень их соединенности между собой и с внешней поверхностью гранул, что определяет в конечном счете как механические, так и экстракционные свойства ТВЭКСов [19].

При этом емкость зависит как от количества импрегнированного экстрагента, так и от состава водной фазы, в которой вещества находятся в виде ионов, слабо переходящих в фазу твердофазного экстрагента. Поэтому перед использованием ТВЭКС ТОДГА ионы вещества в растворе должны быть переведены в нейтральные комплексы или другие недиссоциированные соединения. Этого можно достичь путем добавления в раствор нейтральных солей, которые снижают растворимость разделяемых элементов, смещают экстракционное распределение и значительно повышают эффективность извлечения. Этот эффект называется высаливание и часто встречается при экстракции в высокосолевых исследуемых средах. Высаливанием называется выделение вещества из раствора путем добавления в раствор другого хорошо растворимого в данном растворителе вещества: высаливателя. Высаливаемое вещество извлекается в виде новой фазы – твердого осадка, жидкой или газовой фазы, причем в случае жидкостной экстракции происходит увеличение емкости экстрагента по целевому компоненту. Высаливание происходит в результате повышения термодинамической активности высаливаемого вещества при добавлении высаливателя, независимо от того, происходит ли образование новой фазы при этом процессе или нет [20]. Поэтому добавление в водную фазу солей-высаливателей, для повышения ионной силу раствора увеличивает коэффициенты распределения извлекаемых веществ, что в свою очередь, повышает емкость сорбентов. Ранее было проведено исследование сорбции америция-241 и урана с использованием твердофазного экстрагента на основе N, N, N', N' – тетраактилдигликольамида (ТВЭКС ТОДГА) [21,22]. Однако в данных статьях не была подробно рассмотрена кинетика америция-241 и урана в процессе их сорбции с использованием опытного модифицированного образца ТВЭКС ТОДГА с различным содержанием NaNO_3 в исследуемых растворах. Данная работа посвящена исследованию процесса высаливания америция-241 и урана в процессе их сорбции с целью увеличения емкости ТВЭКС ТОДГА в модельных растворах ЖРО с различным содержанием солей. Данное исследование выполнено в рамках научно-исследовательского проекта: «Расчетно-экспериментальное обоснование радиационно-эквивалентного удаления радиоактивных отходов ПЯТЦ, разработка обеспечивающих технологий и оборудования», проекта «Прорыв».

Постановка задачи исследования

Исследование процесса высаливания америция-241 и урана в процессе их сорбции с использованием ТВЭКС ТОДГА проводилась для наиболее перспек-

тивного опытного модифицированного образца ТВЭКС ТОДГА [19,20]. Состав базовой матрицы образца – высокопористый полистирол; шивка – дивинилбензол, содержание стирола, этилстирола и других компонентов полимеризационной смеси соответствует промышленным ТВЭКС–ТБФ и ТВЭКС–ФОР. В образце использовалась модификация базовой полистирольной матрицы с применением полиакрилонитрила, позволяющая фиксировать ТОДГА в матрице не только за счет физической адсорбции в микропорах на полистироле, но и за счет ковалентных или координационных связей с функциональными группами матрицы. Дополнительная фиксация ТОДГА в матрице может привести к уменьшению вымываемости экстрагента и улучшению эксплуатационных характеристик синтезированного ТВЭКСа. Кроме того, модификация состава матрицы и ее промежуточная обработка могут сказаться на скорости диффузии целевых компонентов и, соответственно, кинетических характеристиках ионообменных процессов. Опытный модифицированный образец представлен на рисунке 2, его состав представлен в таблице 1.



Рисунок 2. Исследуемый опытный модифицированный образец ТВЭКС ТОДГА

Figure 2. The experimental modified sample of solid-phase extractant based on TODGA under study

Таблица 1. Состав опытного модифицированного образца ТВЭКС ТОДГА

Table 1. Composition of an experimental modified sample of solid-phase extractant based on TODGA

Модифицирующий мономер (содержание 40% масс)	Нитрил акриловая кислота
Содержание ТОДГА, % масс	40
Тип функционала	катионит
Полная объемная емкость матрицы, мг-экв/г	0,72
Степень конверсии НАК, %	25
Содержание полимера НАК, % масс	30
Температура гидролиза, °С	70
Пористость матрицы, %	57,7
Удельная поверхность матрицы, м ² /г	11,8

В исследовании в качестве соли-высаливателя использовали NaNO_3 . Для исследования процесса высаливания в системе америция-241 и урана в процессе сорбции в эксперименте использовался метод ограниченного объема, т.е. обменный процесс происходит в реакторе с постоянным объемом перемешиваемого раствора. Аналитический контроль объемной активности америция-241 (59,54 кэВ) проводился с использованием гамма-спектрометрического автоматизиро-

ванного спектрометра. Погрешность каждого измерения составляла не более 12–13%. Измеренная гамма-спектрометрическим методом объемная активность америция-241 в растворе затем пересчитывалась в размерность мг/л. Определение содержания урана в модельных растворах, содержащих америций-241, проводилось с использованием метода ICP-MS (масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой). Погрешность измерения составляет 5 % [23].

Для расчета содержания америция-241 и урана в ТВЭКС ТОДГА, в соответствии с материальным балансом, использовалась следующая формула (1):

$$C_{\text{MeТВЭКС}} = V_{p-p} (C_{\text{исхMe}} - C_{\text{остMe}}) / V_{\text{ТВЭКС}}, \quad (1)$$

где V_{p-p} – объем раствора, мл;

$C_{\text{исхMe}}$ – исходная концентрация радионуклида в растворе, мг/л;

$C_{\text{остMe}}$ – остаточная концентрация радионуклида в растворе, мг/л;

$V_{\text{ТВЭКС}}$ – объем ТВЭКС, мл;

$C_{\text{MeТВЭКС}}$ – концентрация радионуклида в ТВЭКС, мг/л.

Коэффициент распределения определялся по формуле (2):

$$K_d = C_{\text{MeТВЭКС}} / C_{\text{MeP-P}}, \quad (2)$$

где $C_{\text{MeP-P}}$ – концентрация радионуклида в растворе, мг/л.

Проведение эксперимента

С применением описанных выше методик аналитического контроля и формул для расчета содержания америция-241 и урана, с учетом материального баланса (1–2), было проведено исследование их кинетики из модельных высокосолевых растворов ЖРО с различным содержанием NaNO_3 .

Для этого было приготовлено три модельных низкокислотных ($\text{pH}=3,4$) раствора со следующими составами:

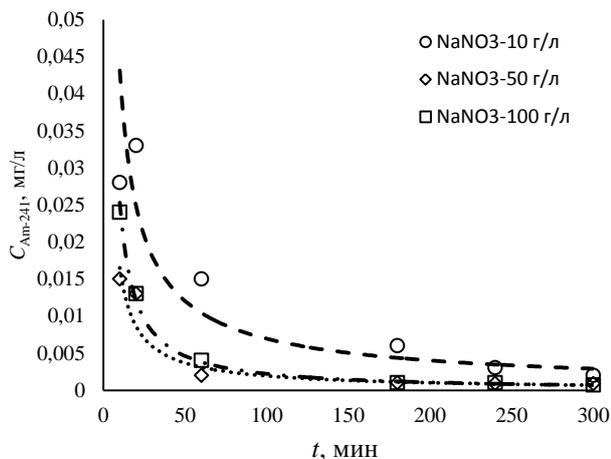


Рисунок 3. Кинетика сорбции америция-241 в модельных растворах ЖРО с различным содержанием NaNO_3
Figure 3. Kinetics of americium-241 sorption in model solutions of LRW with different NaNO_3 contents

1. NaNO_3 – 10 г/л: америций-241 – 0,044 мг/л; уран – 1452 мг/л;

2. NaNO_3 – 50 г/л: америций-241 – 0,031 мг/л; уран – 1014 мг/л;

3. NaNO_3 – 100 г/л: америций-241 – 0,040 мг/л; уран – 1000 мг/л.

Эти исследуемые модельные растворы ЖРО характеризуются высоким солевым составом и относительно низкой кислотностью среды. Объемное соотношение растворов и ТВЭКСа составляло 50:1 (мл). Исследования проводили при комнатной температуре с непрерывным перемешиванием механическими мешалками. Время контакта образца в растворах длилось в течение 300 минут. На основании полученных данных были построены кинетические кривые сорбции америция-241 (рис. 3) и урана (рис. 4) в зависимости от содержания NaNO_3 в растворе.

Обсуждение результатов

Из анализа кинетики сорбции америция-241, приведенного на рисунке 3, следует, что если сравнить равновесные концентрации америция-241 в растворе в одной той же точке (300 минут) в последовательности 10 – 50 – 100 г/л NaNO_3 , то они будут иметь значения соответственно значения 0.002 – 0.001 – 0.0007 мг/л. Таким образом, можно констатировать, что в данной системе наблюдается слабый эффект высаливания. При анализе зависимости, представленной на рисунке 4, можно сделать вывод, что при содержании 100 и 50 г/л NaNO_3 кинетика сорбции урана практически совпадают. Подтверждают высказанное предположение данные, приведенные в таблице 2, при сравнении коэффициентов распределения америция-241 и урана при разном солевом фоне раствора.

Анализ данных, представленных в таблице 2, показывает, что наиболее высокие коэффициенты распределения при сорбции америция-241 и урана были получены в растворе с содержанием 100 г/л NaNO_3 .

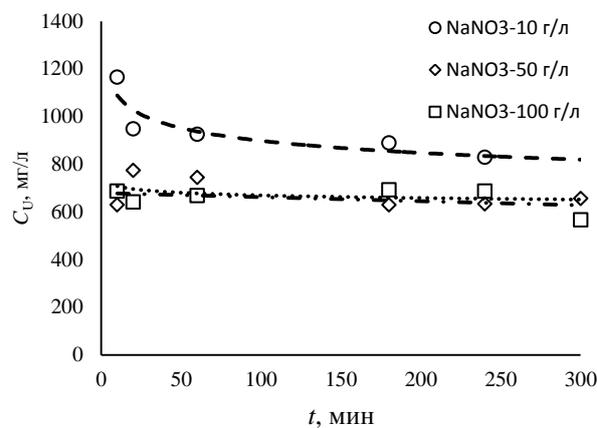


Рисунок 4. Кинетика сорбции урана в модельных растворах ЖРО с различным содержанием NaNO_3
Figure 4. Kinetics of uranium sorption in model solutions of LRW with different NaNO_3 contents

Таблица 2. Сравнение величин коэффициентов распределения для америция-241 и урана из модельных растворов ЖРО с содержанием 10 – 50 – 100 г/л NaNO₃Table 2. Comparison of the values of the distribution coefficients for americium-241 and uranium from model LRW solutions containing 10 – 50 – 100 g/l NaNO₃

Время контакта, мин.	Kd_U для 10 г/л NaNO ₃	Kd_U для 50 г/л NaNO ₃	Kd_U для 100 г/л NaNO ₃	Kd_{Am-241} для 10 г/л NaNO ₃	Kd_{Am-241} для 50 г/л NaNO ₃	Kd_{Am-241} для 100 г/л NaNO ₃
10	12	31	40	29	0.018	0.025
20	27	16	47	17	66	113
60	29	18	42	102	806	506
180	32	31	39	334	1663	1920
240	38	30	40	753	1663	2117
300	– ^a	27	59	931	1743	3045

Примечание: ^a результат не получен

однако для урана этот эффект выражен значительно меньше, чем для америция-241. В процессе исследования кинетики сорбции америция-241 и урана был выявлен эффект высаливания, который подтверждается величинами равновесных концентраций америция-241 и урана в растворе в одной и той же точке времени, но с разной концентрацией NaNO₃. Для америция-241 разница в равновесных концентрациях составила порядок в сторону ее уменьшения при увеличении концентрации NaNO₃ до 100 г/л. Данный эффект позволяет получить максимальную емкость по америцию-241 в системе с урановым макрокомпонентом.

Выводы

В работе проведено исследование процесса высаливания америция-241 и урана в процессе их сорбции с использованием опытного модифицированного образца ТВЭКС ТОДГА с различным содержанием

NaNO₃ в исследуемых модельных высокосолевых растворах ЖРО с урановым макрокомпонентом. Наиболее высокие коэффициенты распределения при сорбции америция-241 и урана были получены в растворе с содержанием 100 г/л NaNO₃, однако для урана этот эффект выражен значительно меньше, чем для америция-241. В процессе исследования кинетики сорбции америция-241 и урана был выявлен эффект высаливания, который подтверждается величинами равновесных концентраций америция-241 и урана в растворе в одной и той же точке времени, но с разной концентрацией NaNO₃. Для америция-241 разница в равновесных концентрациях составила порядок в сторону ее уменьшения при увеличении концентрации NaNO₃ до 100 г/л. Использование данного эффекта позволяет получить максимальную емкость по америцию-241 в системе с урановым макрокомпонентом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Adamov E.O., Mochalov Y.S., Rachkov V.I., Khomyakov Yu.S., Shadrin A.Yu. et al. Spent nuclear fuel reprocessing and nuclear materials recycling in two-component nuclear energy. *Atomic energy*. 2021;130:29–35. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10512-021-00769-w>
- Адамов Е.О., Каширский А.А., Муравьев Е.В., Толстоухов Д.А. Структура и параметры двухкомпонентной ядерной энергетики при переходе к замыканию ядерного топливного цикла. *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2016;5:14–32. EDN: WRJCHN. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_26931859_70056435.pdf (дата обращения: 25.07.2023).
- Адамов Е.О., Алексахин Р.М., Большов Л.А., Дедуль А.В., Орлов В.В. и др. Проект «Прорыв» – технологический фундамент для крупномасштабной ядерной энергетики. *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2015;1:5–13. EDN TLUFGN. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_23112795_31777322.pdf (дата обращения: 25.07.2023).
- Shadrin A.Y., Ivanov V.B., Skupov M.V., Troyanov V.M., Zherebtsov A.A. Comparison of closed nuclear fuel cycle technologies. *Atomic Energy*. 2016;(121):119–126. <https://doi.org/10.1007/s10512-016-0171-2>
- Мясоедов Б.Ф., Калмыков С.Н., Шадрин А.Ю. Химические технологии замыкания ядерного топливного цикла. *Вестник Российской академии наук*. 2021;(91)5:459–469. EDN: UHXNNP. <https://doi.org/10.31857/S0869587321050170>
- Ровный С.И., Шевцев П.П. Современное состояние и пути совершенствования радиохимической технологии выделения и очистки урана и плутония. *Вопросы радиационной безопасности*. 2007;2(46):5–13. EDN: JUUSRF. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_11643604_37252633.pdf (дата обращения: 25.07.2023).
- Sharov V.E., Kostikova G.V. Influence of the nature of the diluent on the extraction of Eu(III), Am(III), and Cm(III) with N,N,N',N'-Tetrabutyl diglycolamide from nitric acid solutions. *Radiochemistry*. 2023;(65):45–51. <https://doi.org/10.1134/S1066362223010071>
- Potential benefits and impacts of advanced nuclear fuel cycles with actinide partitioning and transmutation. Paris: OECD Publishing, NEA. 2011. Available at: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14572/potential-benefits-and-impacts-of-advanced-nuclear-fuel-cycles-with-actinide-partitioning-and-transmutation?details=true (accessed: 15.07.2023).
- Runde W.H., Schulz W.W. Americium. In: Morss L.R., Edelstein N.M., Fuger J. (eds) *The chemistry of the actinide and transactinide elements*. Springer, Dordrecht. 2008. P. 1265–1395. https://doi.org/10.1007/1-4020-3598-5_8
- Lyzlova E.V., Glukhova A.V., Konnikov A.V., Dyug K.O. Development of a sorption technique for the selective separation of plutonium and americium from nitric acid intermediate-level wastes of chemical and metallurgical production. *Radiochemistry*. 2022;64(2):176–182. EDN: YBOFJM. <https://doi.org/10.1134/S1066362222020096>

11. Milyutin V.V., Gelis V.M., Nekrasova N.A., Firsova L.A., Kharitonov O.V., Baulin V.E. Sorption of REE(III), Th(IV), and U(VI) ions from nitric acid solutions with sorbents based on tetraoctyldiglycolamide. *Radiochemistry*. 2015;57(5):513–517. EDN VAGAEX. <https://doi.org/10.1134/S1066362215050100>

12. Виданов В.Л., Парабин П.В., Гуров Г.Л., Широков С.С., Шадрин А.Ю. «Горячий» тест разделения америция и кюрия методом вытеснительной комплексообразовательной хроматографии. *Радиохимия*. 2023;65(3):234–239. EDN: ENRFDS. <https://doi.org/10.1134/S1066362223030049>

13. Milyutin V.V., Khesina Z.B., Lakyushina A.A., Buryak A.K., Nekrasova N.A., Kononenko O.A., Pavlov Yu.S. Chemical durability and radiation resistance of sorbents based on N,N,N',N'-tetra-n-octyldiglycolamide. *Radiochemistry*. 2016;58(1):59–62. EDN: WSLYNB. <https://doi.org/10.1134/S1066362216010094>

14. Mokhodoeva O.B., Myasoedova G.V., Zakharchenko E.A. Solid-phase extractants for radionuclide preconcentration and separation. New possibilities. *Radiochemistry*. 2011;53(1):35–43. EDN: OCDEEH. <https://doi.org/10.1134/S106636221101005X>

15. Ansari S., Pathak P., Mohapatra P., Manchanda V.K. Chemistry of diglycolamides: promising extractants for actinide partitioning. *Chemical Reviews*. 2012;(3)112:1751–1772. <https://doi.org/10.1021/cr200002f>

16. Ansari S.A., Pathak P.N., Manchanda V.K., Husain M., Prasad A.K., Parmar V.S. N,N,N',N'- tetraoctyl diglycolamide (TODGA): a promising extractant for actinide partitioning from high level waste (HLW). *Solvent Extraction and Ion Exchange*. 2005;23(4):463–479. <https://doi.org/10.1081/SEI-200066296>

17. Sasaki Y., Tachimori S. Extraction of actinides (III), (IV), (V), (VI), and lanthanides (III) by structurally tailored diamides. *Solvent Extraction and Ion Exchange*. 2002;20(1):21–34. <https://doi.org/10.1081/SEI-100108822>

18. Horwitz E.P., McAlister D.R., Bond A.H., Barrans Jr R.E. Novel extraction of chromatographic resins based on tetraalkyldiglycolamides: characterization and potential applications. *Solvent Extraction and Ion Exchange*. 2005;23(3):319–344. <https://doi.org/10.1081/SEI-200049898>

19. Коровин В.Ю., Рандаревич С.Б. Синтез, свойства и применение твердых экстрагентов (обзор). *Химическая технология*. 1991;(5):3. Режим доступа: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=wd3JTtYAAAAAJ&citation_for_view=wd3JTtYAAAAAJ:dshw04ExmUIC (дата обращения: 02.08.2023).

20. Аляпышев М.Ю., Бабаин В.А., Кенф Е.В. и др. Способ выделения америция из жидких радиоактивных отходов и отделения его от редкоземельных элементов. *Патент РФ № 2603405 RU. Дата публикации 27.11.2016. Бюл. №33*. Режим доступа: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=0002603405&TypeFile=html (дата обращения: 02.08.2023).

21. Klochkova N.V., Savel'ev A.A., Pozdnyakova N.Y., Pisanenko S.S., Anan'ev A.V. Investigation of americium sorption from model liquid radwaste solutions using TODGA-based solid-phase extractant. *Atomic Energy*. 2019;127:40–44. <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00581-7>

22. Савельев А.А., Ключкова Н.В., Рачков В.И. Определение коэффициентов диффузии америция и урана в процессе их сорбции на твердофазном экстрагенте на основе ТОДГА. *Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»*. 2020;9(4):293–297. EDN: EBLTGY. <https://doi.org/10.1134/S2304487X20040070>

23. Савельев А.А., Ключкова Н.В., Рачков В.И. Методы аналитического контроля америция-241 и урана в процессе их сорбции на твердофазном экстрагенте на основе ТОДГА. *Ядерная физика и инжиниринг*. 2021;12(1):16–20. EDN: GKYTQM. <https://doi.org/10.56304/S2079562920060482>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Савельев А.А. – изучение тематического материала, систематизация информации, выявление и исследование факторов, требующих дополнительных исследований и принятия компенсирующих мер для решения проблем, написание текста статьи;

Рачков В.И. – концепция и качественная разработка исследования.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Александр Александрович Савельев, старший преподаватель института ядерной физики и технологий, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7975-9211>

e-mail: aasavelev@mephi.ru

Валерий Иванович Рачков, член корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплофизики института ядерной физики и технологий, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.
e-mail: rvi@proryv2020.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Savelev A.A. – study of thematic material, systematization of information, results analysis, identification and researching factors requiring further research and the implementation of compensatory measures to address issues writing the text of the article;

Rachkov V.I. – conceptualization and qualitative research design.

FUNDING:

The study had no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Aleksandr A. Savelev, Senior Lecturer at the Institute of Nuclear Physics and Technology, National Research Nuclear University «MPhI», Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7975-9211>

e-mail: aasavelev@mephi.ru

Valeriy I. Rachkov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Thermophysics, Institute of Nuclear Physics and Technology, National Research Nuclear University «MPhI», Russian Federation.
e-mail: rvi@proryv2020.ru

Поступила в редакцию 29.09.2023

После доработки 14.11.2023

Принята к публикации 21.11.2023

Received 29.09.2023

Revision 14.11.2023

Accepted 21.11.2023

УДК 620.91: 620.92

<https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-02>

EDN HJLZIN



Сравнительный эксперимент по оценке эффективности водяного охлаждения фотоэлектрических модулей в климатических условиях Юга России

В.Г. Ильичев¹ , Л.Х. Зайнутдинова¹  , Е.И. Теруков² , М.Ю. Михайлов²

¹Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева, г. Астрахань, Россия

²ООО «Научно-технический центр тонкопленочных технологий в энергетике»,

г. Санкт-Петербург, Россия

 Lzain@mail.ru

Аннотация. Проблемам обеспечения безопасности эксплуатации атомных станций всегда уделяется повышенное внимание. В дополнение к автономным дизель-генераторным установкам, используемым для поддержания работы систем безопасности при потере внешнего энергоснабжения, на настоящем этапе целесообразно также рассмотреть применение более экологичных автономных фотоэлектрических установок. Целью работы является проведение сравнительного экспериментального исследования эффективности водяного охлаждения в реальных естественных климатических условиях Юга России, когда охлаждаемый и неохлаждаемый фотоэлектрические модули одновременно находятся под воздействием комплекса переменчивых погодных факторов: солнечной радиации, облачности, ветра, давления, температуры и влажности окружающей среды, при этом оба модуля имеют нагрузки, подключенные через МРРТ контроллеры. Исследовано влияние водяного охлаждения на энергетическую эффективность фотоэлектрических модулей, собранных из кремниевых гетероструктурных (НТ) солнечных ячеек. Солнечные панели были изготовлены из НТ ячеек толщиной 130 мкм, соединенных между собой по технологии контактирования SmartWire, которая уменьшает потери мощности из-за возникновения возможных дефектов, например, трещин. Выполнены условия по обеспечению наибольшей идентичности параметров охлаждаемого и неохлаждаемого модулей. Сравнительное экспериментальное исследование проведено на площадке Астраханского государственного университета с использованием системы долгосрочного мониторинга характеристик фотоэлектрических модулей – тестовой фотоэлектрической системы (ТФЭС), построенной на базе электронного регистратора «Параграф PL2». Установлено значительное повышение выработки модуля при работе с охлаждением. При инсоляции 987,5 Вт/м² мощность, вырабатываемая охлаждаемым модулем, составляла 93,0297 Вт, в то время как мощность модуля без охлаждения была равна 79,306 Вт. Разница составила 13,7237 Вт. Мощность возросла на 17%. В проведенном эксперименте среднее значение КПД при охлаждении модуля составило 0,15977, при отсутствии охлаждения 0,13764. Коэффициент полезного действия повысился на 2,21 %. Такое повышение является существенным. Полученные результаты подтверждают достаточно высокую эффективность водяного охлаждения фотоэлектрических модулей в реальных естественных условиях работы для регионов с высокими температурами окружающей среды, в частности для Юга России.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, водяное охлаждение, кремниевые гетероструктурные солнечные ячейки, сравнительный эксперимент, тестовая фотоэлектрическая система, энергоэффективность.

Для цитирования: Ильичев В.Г., Зайнутдинова Л.Х., Теруков Е.И., Михайлов М.Ю. Сравнительный эксперимент по оценке эффективности водяного охлаждения фотоэлектрических модулей в климатических условиях Юга России. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(4):11–21. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-02>

For citation: Ilyichev V.G., Zaynutdinova L.Kh., Terukov E.I., Mikhailov M.Yu. Comparative experiment on the efficiency of water cooling in photovoltaic modules in the climatic conditions of Southern Russia. *Global nuclear safety*. 2023;13(4):11–21 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-02>

Comparative experiment on the efficiency of water cooling in photovoltaic modules in the climatic conditions of Southern Russia

Vladimir G. Ilyichev¹ , Larisa Kh. Zaynutdinova¹  , Evgenii I. Terukov² ,
Mikhail Yu. Mikhailov²

¹Astrakhan Tatishchev State University, Astrakhan, Russian Federation

²R&D Center of Thin Film Technologies in Energetics, St. Petersburg, Russian Federation.

 Lzain@mail.ru

Abstract. The problems of ensuring the safety of operation of nuclear power plants are always paid increased attention. In addition to the self-contained diesel generator sets used to maintain the operation of safety systems in case of loss of external power supply, it is also advisable to consider the use of more environmentally friendly self-contained photovoltaic units at this stage. The work is aimed at a comparative experimental study of the efficiency of water cooling in real natural climatic conditions of Southern Russia. In this experiment, cooled and uncooled photovoltaic modules are simultaneously exposed to a complex of variable weather factors: solar radiation, cloudiness, wind, pressure, temperature and humidity of the environment. Both modules have loads connected via MPPT controllers. The effect of water cooling on the energy efficiency of photovoltaic modules assembled from silicon heterojunction technology (HJT) solar cells was studied. The solar panels were made from 130 micron thick HJT cells interconnected using SmartWire contact technology. It reduces power loss due to possible defects such as cracks. The conditions for ensuring the highest degree of similarity between the parameters of the cooled and uncooled modules have been met. A comparative experimental study was conducted in Astrakhan State University using a long-term monitoring system for the characteristics of photovoltaic modules. This is a test photovoltaic system (TPS), built on the basis of the Paragraph PL2 electronic recorder. A significant increase in module output when working with cooling was established. At insolation of 987.5 W/m², the power generated by the cooled module was 93.0297 W, while the power of the module without cooling was 79.306 W. The difference comprised 13.7237 watts. Power increased by 17%. In the experiment, the average efficiency value when the module was cooled was 0.15977. When uncooled, it was 0.13764. The efficiency intensified by 2.21%. This increase is significant. The results obtained confirm the fairly high efficiency of water cooling in photovoltaic modules in real natural operating conditions for regions with high ambient temperatures, Southern Russia, in particular.

Keywords: photovoltaic module, water cooling, silicon heterojunction solar cells, comparative experiment, test photovoltaic system, energy efficiency.

Введение

Солнечная энергия является одним из важных видов возобновляемых источников энергии, который привлекает к работе многих исследователей по всему миру. Одной из наиболее распространенных технологий является использование фотоэлектрических систем (сетевых и автономных), преобразующих солнечный свет в полезную электрическую энергию. Этот тип технологии возобновляемых источников энергии не загрязняет окружающую среду во время эксплуатации, уменьшает проблемы глобального потепления, снижает эксплуатационные расходы и обеспечивает минимальное техническое обслуживание. Автономные фотоэлектрические системы вполне могут дополнять автономные дизель-генераторные установки, используемые для поддержания работы систем безопасности атомных станций при потере внешнего энергоснабжения. Помимо преимуществ у фотоэлектрической технологии есть недостаток, заключающийся в зависимости выработки электроэнергии от погодных факторов, таких как влияние града, снега, пыли, ветра, температуры и влажности окружающей среды. Производительность фотоэлемента особенно чувствительна к температуре поверхности ячейки, которая зависит как от ряда погодных факторов, так и от материала и структуры ячейки [1, 2]. Большая зависимость выработки электроэнергии от погодных факторов и снижение КПД с ростом температуры отмечается также в работах [3-5].

Важным фактором работы солнечных элементов является их температурный режим. Обычно в качестве номинальной для работы солнечного элемента принимается температура +25°C. При нагреве элемента на один градус свыше +25°C он теряет примерно 0,4 % процента напряжения на каждый градус. В летний солнечный день элементы могут нагреваться до 60-70°C.

Солнечные элементы имеют ограниченный КПД – это означает, что они не в состоянии преобразовать всю полученную энергию в электричество; остальная энергия при этом преобразуется в тепло. Повышенная

температура вызывает уменьшение ширины запрещенной зоны полупроводника, т. е. с ростом температуры ширина зоны уменьшается, и ток насыщения увеличивается из-за меньшей энергии, необходимой для образования электронно-дырочных пар. При этом ток короткого замыкания увеличивается незначительно, в то время как напряжение холостого хода уменьшается в большей степени, что и приводит к заметному уменьшению доступного максимума мощности¹.

В ряде исследований и, в том числе в работах И.М. Кирпичниковой [6], влияние температуры на значение выдаваемой солнечным элементом мощности² предлагается определять из выражения (1):

$$P_{CЭ} = P_0 (1 + \beta \Delta t) \quad (1)$$

где $P_{CЭ}$ – мощность солнечного элемента, Вт;

P_0 – мощность солнечного элемента при температуре +25 °С, Вт;

β – температурный коэффициент мощности, °С⁻¹;

Δt – приращение температуры, °С.

Температурные коэффициенты мощности для различных фотоэлектрических технологий изменяются от –0.2 до –0.4 % на 1 °С. Для солнечного элемента с температурным коэффициентом $\beta \approx -0.4 \text{ \%}/^\circ\text{C}$. при возрастании температуры ячейки до +50°C произойдет снижение выходной мощности на 10%. В летний солнечный день в условиях Юга России солнечные элементы могут нагреваться до 60-70°C и выше. В этих условиях наблюдается существенное снижение коэффициента полезного действия (КПД). Соответственно, проблема научного обоснования и практической реализации систем охлаждения фотоэлектрических модулей, работающих в климатических условиях

¹ The effect of temperature on solar panel performance [Электронный ресурс]. – Solar calculate. – Режим доступа: <https://solarcalculator.com.au/solar-panel-temperature> (дата обращения: 15.07.2023).

² Там же.

Юга России, с целью повышения их энергоэффективности является актуальной.

Методы охлаждения фотоэлектрических модулей

Принято выделять две группы методов охлаждения фотоэлектрических модулей: активное и пассивное охлаждение. Механизмы пассивного охлаждения относятся к технологиям, используемым для извлечения и/или минимизации поглощения тепла фотоэлектрической панелью без дополнительного энергопотребления. Активные системы потребляют электроэнергию, они используются в ситуациях, когда добавленная эффективность панелей превышает энергию, требуемую для питания системы. Активные системы охлаждения включают в себя отвод тепла с использованием таких устройств, как вентиляторы, устройства для нагнетания воздуха или подачи воды к панелям. Методы активного охлаждения, как правило, более эффективны, но более дорогостоящи.

Как для пассивных, так и для активных систем охлаждения обычно используются охлаждающие среды – воздух и вода. Воздушное охлаждение плохо подходит для извлечения тепловой энергии из фотоэлектрического модуля в жарких регионах. Водяное охлаждение позволяет работать при гораздо более высоких температурах и позволяет более эффективно использовать рекуперацию отработанного тепла [7]. Следовательно, водяное охлаждение во многих случаях является более выгодным вариантом.

Известны различные варианты пассивного охлаждения, простейшие формы включают нанесение твердых частиц из металлов с высокой теплопроводностью, таких как алюминий и медь, или массив ребер или других экструдированных поверхностей для улучшения теплопередачи в окружающую среду. Более сложные системы предполагают использование материалов с фазовым переходом (PCM) и различных методов естественной циркуляции.

Один из методов пассивного охлаждения исследован учеными факультета электромеханики Технологического университета Багдада: «Влияние испарительного охлаждения в сочетании с теплоотводом на производительность фотоэлектрического модуля» [8]. Была использована решетка штыревых ребер в качестве теплоотвода вместе с влажной прокладкой из древесной ваты, служащей новой системой охлаждения фотоэлектрической панели. Система охлаждения была основана на концепции испарительного охлаждения и расширенной области теплопередачи. Использование радиатора с влажной прокладкой в качестве системы охлаждения позволило добиться улучшения среднесуточных выходных токов примерно на 15,9% и выходных напряжений примерно на 17,76%. Недостатком является усложнение конструкции и необходимость поддержания заданной влажности прокладки из древесной ваты.

Способ охлаждения фотоэлектрического модуля путем погружения в воду был рассмотрен Saurabh Mehrotra и др. [9]. Фотоэлектрический элемент, погруженный в воду, контролировался в реальных климатических условиях; температуру поверхности эле-

мента можно было регулировать в диапазоне от 31°C до 39°C. Однако, понятно, что такой подход не может быть рекомендован к широкому применению.

Y. Igwan и др. [10] провели эксперимент с водяным охлаждением в помещении. В качестве солнечного симулятора были установлены галогенные лампы на стальной раме. Лампы действуют как естественный солнечный свет. Для проведения эксперимента были выбраны четыре набора средней солнечной радиации на испытательной поверхности солнечного симулятора, измеренные как 413, 620, 821 и 1016 Вт/м². В качестве нагнетателя охлаждающей жидкости был выбран водяной насос постоянного тока. Результаты эксперимента показали, что снижение рабочей температуры примерно на 5-23°C увеличивает выходную мощность фотоэлектрического модуля с механизмом водяного охлаждения на 9-22%. Согласно результатам, представленным авторами, водяное охлаждение оказывает наибольшее влияние на снижение рабочей температуры фотоэлемента и улучшает электрические характеристики фотоэлектрической панели. К сожалению, поскольку эксперимент был проведен в помещении, влияние ряда погодных факторов не рассматривалось.

Влияние водяного охлаждения на производительность фотоэлектрической панели было также исследовано авторами [11]. Целью этого исследования было прогнозирование распределения температуры по площади фотоэлектрических панелей при наличии и отсутствии водяного охлаждения. В системе водяного охлаждения вода течет по передней поверхности фотоэлектрической панели, чтобы снизить температуру фотоэлектрической панели. Результат этого исследования показал, что среднее значение распределения температуры фотоэлектрической панели без системы водяного охлаждения выше, чем с системой водяного охлаждения. Средняя температура фотоэлектрической панели без системы охлаждения составляет 50,68°C. Для системы водяного охлаждения с температурой воды на входе 20°C можно было снизить температуру фотоэлектрической панели на 15,63°C. Полученное распределение температуры по поверхности фотоэлектрической панели может быть полезным для дальнейших исследований.

Альберто Бенато и Анна Стоппато [12] экспериментировали с установкой, в которой система охлаждения оснащена 3 форсунками, характеризующимися углом распыления 90°. Работа при входном давлении 1,5 бар, которая остается активной в течение 30 с и отключается в течение 120 с, может снизить температуру модуля на 28°C и повысить эффективность модуля с 12,2% к 13,9%. Для имитации солнечного излучения над фотоэлектрическим модулем на расстоянии 1 м установлены две галогенные лампы мощностью 1000 Вт, светоотдачей 33000 люмен. Здесь также не рассматривалось влияние других погодных факторов.

Анализ известных работ показывает, что тренд на внедрение систем охлаждения фотоэлектрических модулей постепенно развивается. Для оценки эффективности систем охлаждения фотоэлектрических модулей необходимо выходить за рамки лабораторных

экспериментов в помещениях к экспериментам в реальных естественных условиях работы, когда фотоэлектрические модули находятся под воздействием комплекса переменчивых погодных факторов, а именно: солнечной радиации, облачности, пыли, ветра, давления, температуры и влажности окружающей среды.

Более того, на наш взгляд, при проектировании систем охлаждения фотоэлектрических модулей надо также принимать во внимание изменение температуры солнечной ячейки в зависимости от тока нагрузки. Согласно исследованиям, проведенным авторами настоящей статьи [13], при подключении к фотоэлектрическому модулю нагрузки, соответствующей точке максимальной мощности, в дневное время суток наблюдалось возрастание температура тыльной стороны модуля на 10 градусов.

Цель настоящего исследования – проведение сравнительного экспериментального исследования эффективности водяного охлаждения в реальных естественных климатических условиях Юга России, когда охлаждаемый и не охлаждаемый фотоэлектрические модули одновременно находятся под воздействием комплекса переменчивых погодных факторов: солнечной радиации, облачности, ветра, давления, температуры и влажности окружающей среды, при этом оба модуля имеют нагрузки, подключенные через МРРТ контроллеры. Как известно, такие контроллеры используют технологию поиска точки максимальной мощности (МРРТ) и повсеместно применяются на действующих солнечных электростанциях.

Организация и методика проведения эксперимента

С целью повышения достоверности оценки влияния водяного охлаждения на энергетическую эффективность фотоэлектрических модулей в данной работе были выполнены условия по обеспечению наибольшей идентичности параметров охлаждаемого и не охлаждаемого модулей.

Данная работа посвящена исследованию влияния водяного охлаждения на энергетическую эффективность фотоэлектрических модулей, собранных из кремниевых гетероструктурных (НТ) солнечных ячеек. Солнечные панели были изготовлены из НТ ячеек

толщиной 130 мкм, соединенных между собой по технологии контактирования SmartWire, которая уменьшает потери мощности из-за возникновения возможных дефектов, например, трещин [14]. Материалы, используемые при сборке и конструктивные параметры фотоэлектрических модулей приведены в таблице 1.

Идентичность испытуемых фотоэлектрических модулей проверялась путем сравнения изображений электролюминесценции, позволяющих визуализировать возможные повреждения в модуле. Измерения электролюминесценции осуществлялись на установке SolarModule EL-lab. Полученные изображения приведены на рисунке 1.

Представленные изображения электролюминесценции свидетельствуют об отсутствии повреждений рассматриваемых фотоэлектрических модулей.

Идентичность испытуемых фотоэлектрических модулей также проверялась путем сравнений вольт-амперных характеристик модулей. Для измерения вольт-амперных характеристик использовался иммитатор солнечного излучения CetusPV-ModuleTest3 компании h.a.l.m. elektronik GmbH. Основные параметры вольт-амперных характеристик приведены в таблице 2 с общепринятыми обозначениями: I_{sc} – ток короткого замыкания; U_{oc} – напряжение холостого хода; I_{mpp} , U_{mpp} , P_{mpp} – соответственно, ток, напряжение и мощность в точке максимальной мощности; FF – коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики (ВАХ) солнечного элемента.

Приведенные в таблице 2 характеристики были получены при стандартном значении инсоляции 1000 Вт/м^2 в условиях лабораторного эксперимента. Сведения, приведенные в таблице 2 свидетельствуют о достаточной идентичности вольт-амперных характеристик рассматриваемых фотоэлектрических модулей.

Также была проведена проверка идентичности характеристик модулей в реальных условиях. 2 июня 2023 г. было проведено снятие вольт-амперных характеристик в условиях естественной освещенности на крыше Учебного корпуса Астраханского государственного университета.

Таблица 1. Конструкция фотоэлектрических модулей

Table 1. Architecture of photovoltaic modules

Наименование модуля	Количество ячеек	Размер стекла, мм	Размер ФЭМ, мм	Тип ФЭМ	Фронтальное стекло	Инкапсулянт	Ячейки	Тыльный лист
211116_1	4x5	870x677	878x675	стекло-тыльный лист	3,2мм с антиотражающим покрытием	несшиваемый инкапсулянт ТПО	5,77W (Q5) SWCT	тыльный защитный лист без алюминия
211116_2 охлаждаемый	4x5	870x677	878x675	стекло-тыльный лист	3,2мм с антиотражающим покрытием	несшиваемый инкапсулянт ТПО	5,77W (Q5) SWCT	тыльный защитный лист без алюминия

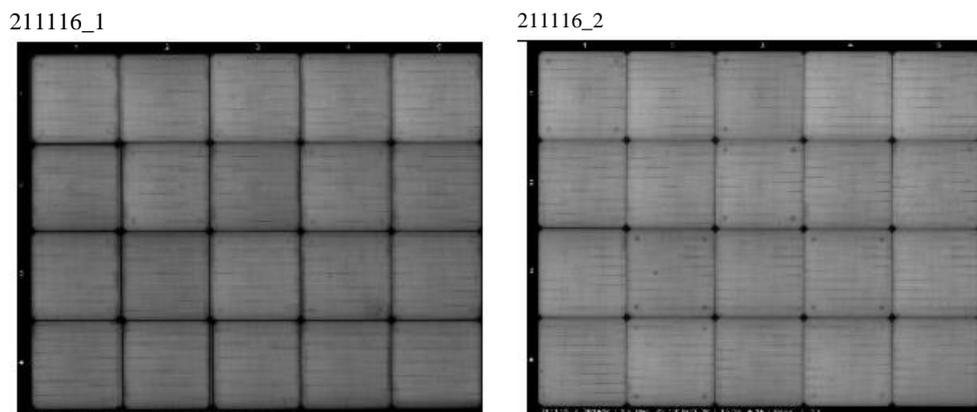


Рисунок 1. Изображения электролюминесценции
Figure 1. Electroluminescence images

Таблица 2. Характеристики фотоэлектрических модулей
Table 2. Characteristics of photovoltaic modules

Название	I_{sc} , А	U_{oc} , В	I_{mp} , А	U_{mp} , В	P_{mp} , Вт	FF, %
211116_1	9,08	14,72	8,58	12,21	104,7	78,36
211116_2 охлаждаемый	8,98	14,71	8,49	12,17	103,29	78,18

Одновременно снимались ВАХ обоих модулей (чтобы избежать погрешности от влияния изменчивости солнечной радиации). В качестве нагрузки использовались проволочные реостаты с регулируемым сопротивлением. В результате измерений были получены следующие значения: U_{oc} – напряжение холостого хода, для первого модуля 13,8 В, для второго модуля 13,649 В, при солнечной радиации 880 Вт/м²; I_{sc} – ток короткого замыкания, для первого модуля 9,08 А, для второго модуля 8,98 А, при солнечной радиации 873 Вт/м².

Таким образом, была подтверждена высокая идентичность характеристик двух фотоэлектрических модулей, предназначенных для проведения сравнительного эксперимента.

Первый модуль будет испытываться без охлаждения, а второй – будет подвержен водяному охлаждению с использованием разработанной авторами автоматизированной системы. Все внешние погодные факторы оказывают одинаковое влияние на оба модуля. Различие в выработке электроэнергии упомянутых модулей будет определяться только водяным охлаждением.

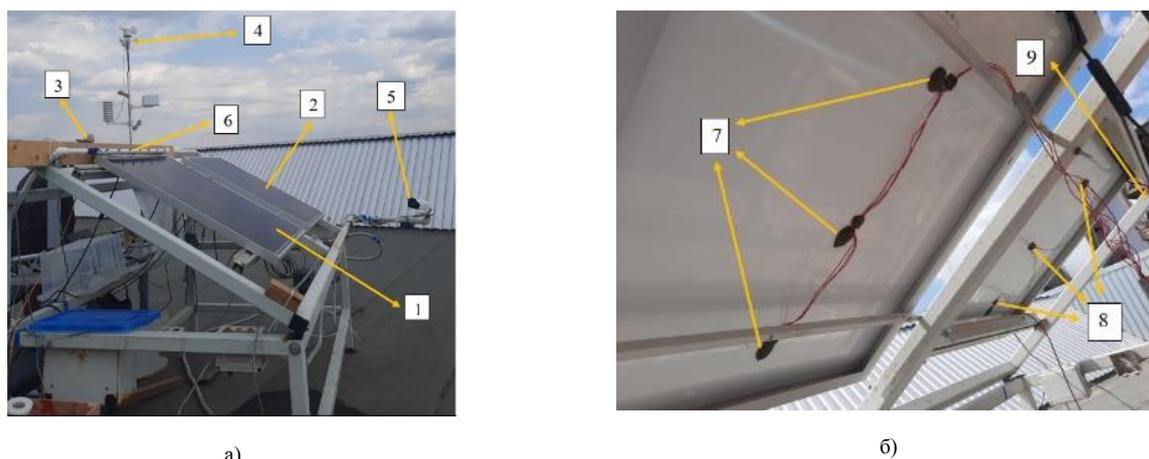
Экспериментальное исследование проведено нами с использованием системы долгосрочного мониторинга характеристик фотоэлектрических модулей – тестовой фотоэлектрической системы (ТФЭС). Общество с ограниченной ответственностью «Научно-технический центр тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе» и ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет» 22 января 2013 г. заключили соглашение о сотрудничестве в области возобновляемой солнечной энергетики путем создания системы мониторинга солнечной инсоляции в Астраханской области, совместного участия в научно-практических исследованиях и подго-

товке высококвалифицированных кадров в сфере возобновляемых источников энергии, в рамках которого 8 мая 2013 года в Астраханской области на крыше одного из учебных корпусов Астраханского государственного университета была установлена упомянутая тестовая фотоэлектрическая система (ТФЭС). Общий вид экспериментальной установки приведен на рисунке 2.

Система мониторинга характеристик фотоэлектрических модулей построена на базе электронного регистратора «Параграф PL2», который обеспечивает круглосуточный сбор, хранение данных о мощностных, температурных характеристиках, уровне солнечной иррадиации, а также обеспечивает доступ к этим данным посредством подключения к сети Internet. Отбор энергии от фотоэлектрического модуля обеспечен системой, состоящей из контроллера заряда с удержанием точки максимальной мощности, аккумулятора и электрической нагрузки. Система позволяет производить круглосуточное измерение характеристик фотоэлектрических модулей, работающих в естественных условиях [15].

Результаты эксперимента

В таблице 3 приведены результаты измерений от 31 августа 2023 года для модуля с охлаждением: скорость ветра, температура тыльной стороны модуля, температура окружающей среды, солнечная радиация, напряжение U , и сила тока I на выходе модуля. Благодаря имеющейся в нашем распоряжении системе мониторинга [16] все показатели фиксировались ежеминутно. В статье с целью сокращения объема таблиц результаты измерений и вычислений приведены с более крупным шагом. Мощность $P_{охл}$, отдаваемая в нагрузку охлаждаемым модулем, определена как произведение силы тока на напряжение.



а)

б)

Рисунок 2. Общий вид экспериментальной установки. а) внешний вид опорной конструкции ТФЭС с размещенными на ней испытуемыми ФЭМ: 1 – фотоэлектрический модуль охлаждаемый, 2 – фотоэлектрический модуль без охлаждения, 3 – датчик солнечной радиации, 4 – датчик скорости и направления ветра, 5 – камера наблюдения, 6 – гребенка с распылительными форсунками; б) вид задней поверхности ФЭМ: 7 – температурные датчики задней поверхности фотоэлектрического модуля без охлаждения, 8 – температурные датчики охлаждаемого модуля, 9 – температурный датчик окружающей среды

Figure 2. General view of the experimental installation. а) appearance of the support structure of the TFS with the tested FEM located on it: 1 – a cooled photovoltaic module, 2 – a non-cooled photovoltaic module, 3 – a solar radiation sensor, 4 – a wind speed and direction sensor, 5 – a surveillance camera, 6 – a comb with spray nozzles; б) view of the rear surface of the FEM: 7 – temperature sensors of the rear surface of the photoelectric module without cooling, 8 – temperature sensors of the cooled module, 9 – ambient temperature sensor

Таблица 3. Результаты измерений для модуля с охлаждением

Table 3. Measurement results for a cooled module

Время	Ветер, м/с	t мод., °С	t окр средь, °С	Солнечная радиация, Вт/м ²	U, В	I, А	P _{охл.} Вт
12:00	0,6945	55,05	27,1	977,875	10,0145	7,395397	74,06135
12:01	0,6945	54,53	27,2	977,875	10,0946	7,330300	73,99667
12:02	0,30558	52,5	27,1	978,5	10,11235	7,321739	74,03999
12:03	0,30558	47,54	27,2	983,875	10,3657	7,351303	76,20141
12:04	0,6945	42,18	27,1	983,125	10,55548	7,89269	83,31116
12:05	0,30558	38,94	26,9	981,5	11,18966	8,28718	92,73079
12:06	0	37,24	27,3	987,5	11,69025	7,95788	93,02970
12:07	0	36,23	27,2	986,875	11,99492	7,73471	92,77734
12:20	0	35,71	27,2	993,375	12,23912	7,62194	93,28599
12:30	0,6945	34,81	27,1	991,875	12,52445	7,42202	92,95676
12:40	1,00008	35,81	27,2	1000,625	12,29178	7,64653	93,98956
12:50	1,69458	37,65	26,9	999,875	11,70709	8,05288	94,27590
13:00	0,6945	36,93	26,8	999,25	11,91845	7,89375	94,08139
13:10	0,30558	37,13	26,9	994	11,79727	7,93601	93,62340
13:20	0,30558	37,83	27,0	988,125	11,52270	8,08812	93,19705
13:30	0	36,43	26,8	978,625	11,83625	7,77593	92,03795
13:40	0,30558	37,73	26,9	968,5	11,33241	8,05849	91,32217
13:50	0,30558	36,72	26,9	956	11,48671	7,831412	89,95717
14:00	0,30558	38,84	26,9	943,5	10,75121	8,291517	89,14384

Влияние скорости ветра на выходную мощность фотоэлектрического модуля в силу малых значений скоростей ветра оказалось незначительным. Изменение выходной мощности охлаждаемого фотоэлектрического модуля во времени представлено на рисунке 3 – выходная мощность фотоэлектрического модуля

практически безынерционно реагирует на изменение солнечной радиации: с ростом солнечной радиации выходная мощность увеличивается. В таблице 4 приведены результаты измерений от 31 августа 2023 г. для модуля, работающего без охлаждения.

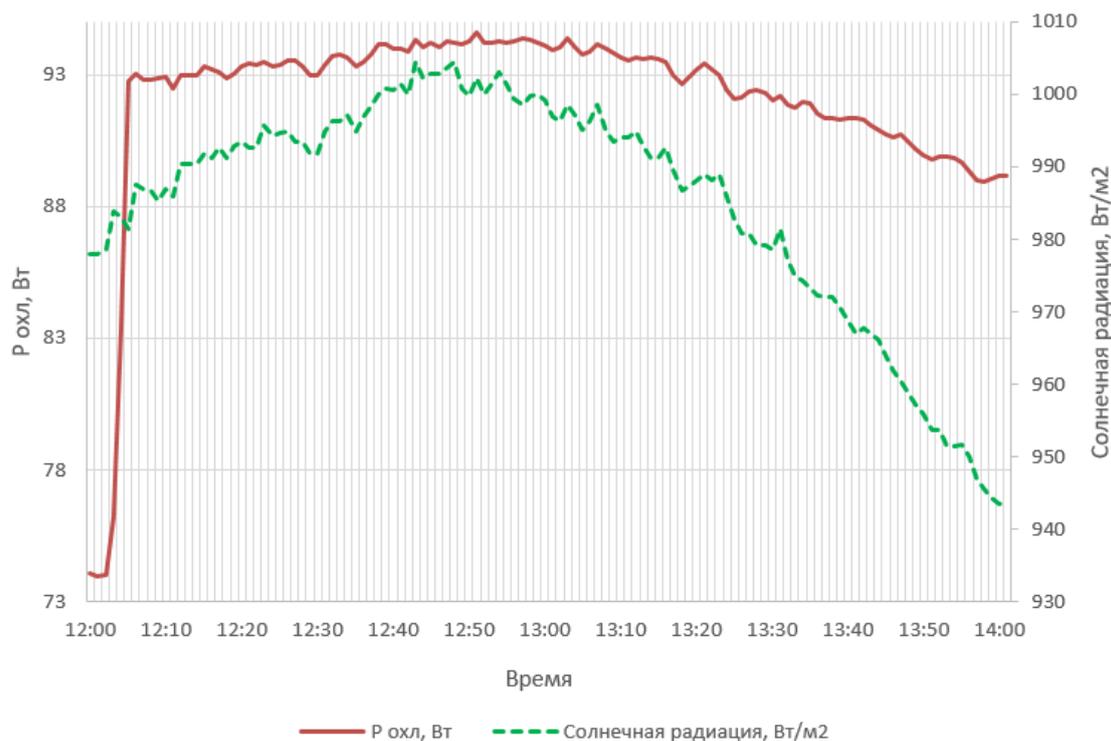


Рисунок 3. Выходная мощность охлаждаемого фотоэлектрического модуля и солнечная радиация. Эксперимент 2023-08-31

Figure 3. Cooled PVM power output and solar radiation. Experiment dated 2023-08-31

Таблица 4. Результаты измерений для модуля, работающего без охлаждения

Table 4. Measurement results for an uncooled module

Время	Ветер, м/с	t мод, °C	t окр среды, °C	Солнечная радиация, Вт/м ²	U, В	I, А	P без охл, Вт
12:00	0,6945	57,19	27,1	977,875	10,36959	7,676101	79,59804
12:01	0,6945	56,98	27,2	977,875	10,40891	7,639925	79,52333
12:02	0,30558	55,76	27,1	978,5	10,65021	7,429740	79,12833
12:03	0,30558	55,05	27,2	983,875	10,85237	7,306242	79,29005
12:04	0,6945	54,35	27,1	983,125	10,98739	7,186173	78,95734
12:05	0,30558	54,35	26,9	981,5	10,96873	7,186584	78,82777
12:06	0	54,35	27,3	987,5	11,03762	7,185074	79,30617
12:07	0	54,24	27,2	986,875	11,05342	7,166344	79,21268
12:20	0	55,16	27,2	993,375	10,93759	7,322704	80,09281
12:30	0,6945	56,48	27,1	991,875	10,65839	7,550011	80,47098
12:40	1,00008	58,2	27,2	1000,625	10,42835	7,843675	81,79660
12:50	1,69458	56,59	26,9	999,875	10,72530	7,566799	81,15622
13:00	0,6945	56,59	26,8	999,25	10,71841	7,566964	81,10585
13:10	0,30558	58,52	26,9	994	10,29904	7,900688	81,36953
13:20	0,30558	56,59	27,0	988,125	10,59574	7,569948	80,20922
13:30	0	54,64	26,8	978,625	10,87609	7,237140	78,71184
13:40	0,30558	56,88	26,9	968,5	10,32489	7,625353	78,73096
13:50	0,30558	56,88	26,9	956	10,18776	7,628973	77,72218
14:00	0,30558	55,05	26,9	943,5	10,39471	7,317145	76,05963

Сопоставление температуры окружающей среды и температуры тыльных сторон фотоэлектрических модулей отражено на рисунке 4. В ходе эксперимента температура окружающей среды сохранялась на уровне +27°C. Температура тыльной стороны фотоэлектрического модуля, работавшего без охлаждения,

изменялась в диапазоне от +54°C до +58 °C. Применение автоматизированной системы водяного охлаждения обеспечило поддержание температуры охлаждаемого модуля в диапазоне от +36°C до +38°C. Было достигнуто снижение температуры модуля в среднем на 20°C.

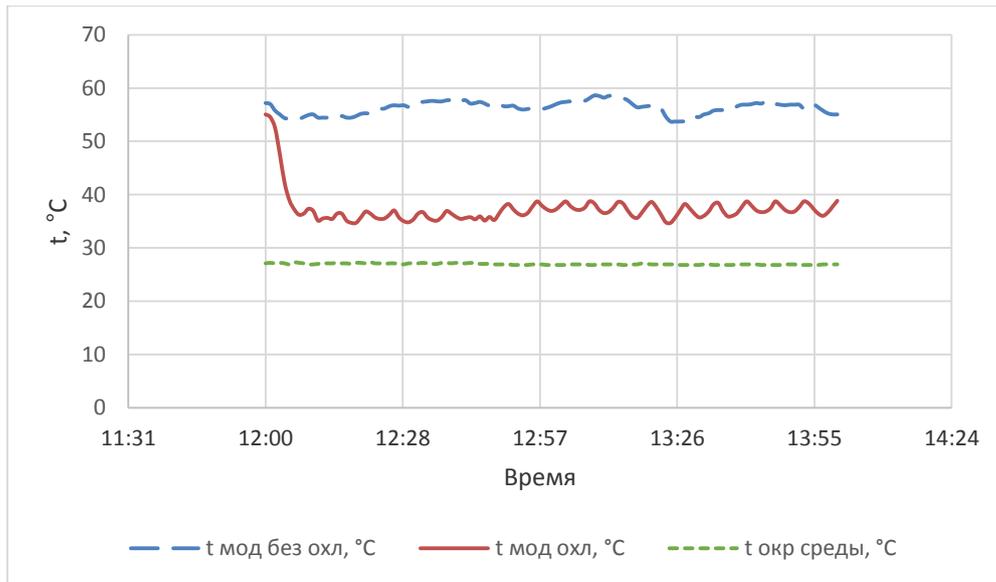


Рисунок 4. Зависимость температуры окружающей среды (зеленый — — — — —), температуры охлаждаемого модуля (красный — — — — —), температуры модуля без охлаждения (синий — — — — —) от времени. Эксперимент 2023-08-31

Figure 4. Dependence of ambient temperature (green — — — — —), cooled module temperature (red — — — — —), uncooled module temperature (blue — — — — —) on time. Эксперимент 2023-08-31

Проведенный эксперимент подтверждает зависимость энергетической эффективности фотоэлектрических модулей от температуры самого модуля. На рисунке 5 представлено сравнение мощностей, вырабатываемых упомянутыми фотоэлектрическими модулями. Из рисунка очевидно значительное повышение выработки модуля при работе с охлаждением. Так,

например, в 12 ч. 06 минут мощность, вырабатываемая охлаждаемым модулем, составляла 93,0297 Вт, в то время как мощность модуля без охлаждения была равна 79,306 Вт. Разница составила 13,7237 Вт. Мощность возросла на 17%. Такое повышение является существенным.

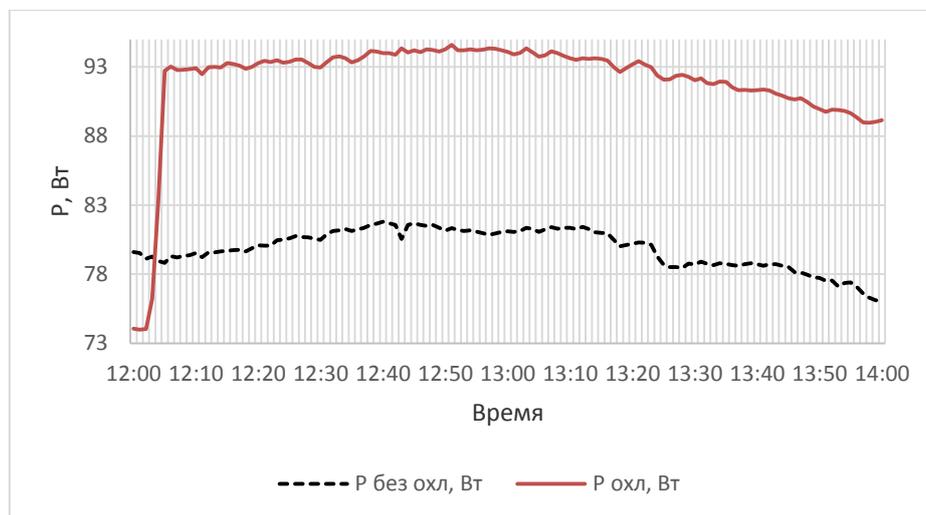


Рисунок 5. Мощность модуля с охлаждением (красный — — — — —), мощность модуля без охлаждения (черный — — — — —). Эксперимент 2023-08-31

Figure 5. Cooled module power (red — — — — —), uncooled module power (black — — — — —). Experiment dated 2023-08-31

Затраты электроэнергии на электропривод насоса невелики, поскольку автоматическое включение насоса происходило на небольшие промежутки времени. Анализ работы системы автоматического поддержания заданной температуры тыльной стороны охлаждаемого модуля будет проведен нами в отдельной статье.

Коэффициент полезного действия

Наиболее важным показателем для оценки энергоэффективности является коэффициент полезного действия (КПД). Расчет КПД фотоэлектрического модуля произведем по формуле (2):

$$\eta = P_2 / P_1 \quad (2)$$

где $P_2=U*I$ – мощность, отдаваемая фотоэлектрическим модулем в нагрузку, (Вт);

P_1 – мощность солнечного излучения, падающего на поверхность фотоэлектрического модуля (Вт).

Мощность солнечного излучения зависит от интенсивности солнечной радиации и площади поверхности, выражение (3):

$$P_1=S*In \text{ (Вт)}, \quad (3)$$

где In – солнечная радиация, Вт/м²;

S – площадь поверхности фотоэлектрического модуля, м².

Для исследованных модулей площадь поверхности составляет $S=0,58899$ м².

В таблице 5 приведены значения мощности солнечного излучения, падающего на поверхность фотоэлектрического модуля P_1 , мощности охлаждаемого фотоэлектрического модуля $P_{2\text{охл}}$, мощности фотоэлектрического модуля работающего без охлаждения P_2 без охл., а также значения коэффициента полезного действия. Среднее значение КПД при охлаждении модуля составляет 0,15977, при отсутствии охлаждения 0,13764. Имеет место повышение КПД на 2,21 %.

Заключение

Проблемам обеспечения безопасности эксплуатации атомных станций всегда уделяется повышенное внимание. В дополнение к автономным дизель-генераторным установкам, используемым для поддержания работы систем безопасности при потере внешнего энергоснабжения, на настоящем этапе целесообразно также рассмотреть применение более экологичных автономных фотоэлектрических установок.

1. Анализ научно-технической литературы показал интерес разработчиков к проблеме охлаждения фотоэлектрических модулей с целью повышения коэффициента полезного действия установок, преобразующих солнечное излучение в электрическую энергию.

Далее для оценки эффективности систем охлаждения фотоэлектрических модулей необходимо выходить за рамки лабораторных экспериментов в помещениях к экспериментам в реальных естественных условиях работы.

2. В настоящей работе проведено сравнительное экспериментальное исследование эффективности водяного охлаждения в реальных естественных климатических условиях Юга России, когда охлаждаемый и неохлаждаемый фотоэлектрические модули одновременно находятся под воздействием комплекса переменчивых погодных факторов: солнечной радиации, облачности, ветра, давления, температуры и влажности окружающей среды, при этом оба модуля имеют нагрузки, подключенные через МРРТ контроллеры.

3. Исследовано влияние водяного охлаждения на энергетическую эффективность фотоэлектрических модулей, собранных из кремниевых гетероструктурных (НТ) солнечных ячеек. Солнечные панели были изготовлены из НТ ячеек толщиной 130 мкм, соединенных между собой по технологии контактирования SmartWire, которая уменьшает потери мощности из-за возникновения возможных дефектов, например, трещин. Выполнены условия по обеспечению наибольшей идентичности параметров охлаждаемого и неохлаждаемого модулей.

4. Сравнительное экспериментальное исследование проведено на площадке Астраханского государственного университета с использованием системы долгосрочного мониторинга характеристик фотоэлектрических модулей – тестовой фотоэлектрической системы (ТФЭС), построенной на базе электронного регистратора «Параграф PL2», который обеспечивает круглосуточный сбор, хранение данных о мощностных, температурных характеристиках, уровне солнечной иррадиации, а также обеспечивает доступ к этим данным посредством подключения к сети Internet.

Таблица 5. Коэффициент полезного действия

Table 5. Efficiency

Время	Солнечная радиация, Вт/м ²	P_1 , Вт	P_2 охл, Вт	КПД охл	P_2 без охл, Вт	КПД без охл
12:00	977,875	575,9585963	74,06135304	0,128587981	79,59804671	0,138200987
12:01	977,875	575,9585963	73,99667151	0,128475679	79,52333335	0,138071267
12:02	978,5	576,326715	74,03999295	0,128468785	79,1283306	0,137297697
12:03	983,875	579,4925363	76,20141153	0,131496795	79,29005054	0,136826698
12:04	983,125	579,0507938	83,31116015	0,143875392	78,95734102	0,136356503
12:05	981,5	578,093685	92,7307913	0,160407895	78,82777516	0,136358132
12:06	987,5	581,627625	93,02970603	0,159947193	79,30617216	0,136352141
12:07	986,875	581,2595063	92,77734012	0,159614319	79,21268014	0,136277651
12:20	993,375	585,0879413	93,28599195	0,159439266	80,09281168	0,136890211
12:30	991,875	584,2044563	92,95676903	0,159116843	80,47098516	0,137744559
12:40	1000,625	589,3581188	93,9895614	0,159477843	81,7966009	0,1387893
12:50	999,875	588,9163763	94,2759057	0,160083688	81,15622746	0,137806029
13:00	999,25	588,5482575	94,08139837	0,159853329	81,10585477	0,137806635
13:10	994	585,45606	93,62340451	0,159915339	81,36953618	0,138984873
13:20	988,125	581,9957438	93,19705523	0,160133568	80,20922091	0,137817539
13:30	978,625	576,4003388	92,03795511	0,159677136	78,71184649	0,136557599
13:40	968,5	570,436815	91,32217249	0,160091653	78,73096992	0,138018739
13:50	956	563,07444	89,95717165	0,159760709	77,72218095	0,138031804
14:00	943,5	555,712065	89,14384424	0,160413728	76,0596381	0,13686879

5. В ходе эксперимента температура окружающей среды сохранялась на уровне +27°C. Температура тыльной стороны фотоэлектрического модуля, работающего без охлаждения, изменялась в диапазоне от +54°C до +58 °C. Применение автоматизированной системы водяного охлаждения обеспечило поддержание температуры охлаждаемого модуля в диапазоне от +36°C до +38°C. Было достигнуто снижение температуры модуля в среднем на 20°C.

6. Установлено значительное повышение выработки модуля при работе с охлаждением. Так, например, при инсоляции 987,5 Вт/м² мощность, вырабатываемая охлаждаемым модулем, составляла 93,0297 Вт, в то время как мощность модуля без охлаждения была

равна 79,306 Вт. Разница составила 13,7237 Вт. Мощность возросла на 17%.

7. Наиболее важным показателем энергоэффективности является коэффициент полезного действия. В проведенном эксперименте среднее значение КПД при охлаждении модуля составляет 0,15977, при отсутствии охлаждения 0,13764. Имеет место повышение КПД на 2,21 %. Такое повышение является существенным.

Полученные результаты подтверждают достаточно высокую эффективность водяного охлаждения фотоэлектрических модулей в реальных естественных условиях работы, что особенно важно для регионов с высокими температурами окружающей среды в летнее время, в частности для Юга России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Adnan Ahmed Siddique, Akram Mohiuddin Syed Mohammed Nahri. Effects of surface temperature variations on output power of three commercial photovoltaic modules. *International Journal of Engineering Research & technology (IJERT)*. 2016;5(11):12–16. Available at: <https://www.ijert.org/research/effects-of-surface-temperature-variations-on-output-power-of-three-commercial-photovoltaic-modules-IJERTV5IS110009.pdf> (accessed: 15.07.2023).
2. Malagouda Patil, Alur Sidramappa, Rajashekargoud Angadi. Experimental investigation of enhancing the energy conversion efficiency of solar PV cell by water cooling mechanism. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;376(1):012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/376/1/012014> Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/376/1/012014/pdf> (accessed: 15.07.2023).
3. Троицкий А.О., Серадская О.В., Кирпичникова И.М. Основные факторы снижения КПД солнечных установок и способы поддержания номинального КПД. *Энерго-и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)*. 2015;3(1):222–225. EDN: TRSQTZ Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23384244_61233041.pdf (дата обращения: 15.07.2023).
4. Дубинин Д.В., Лаевский В.Е. Энергетическая эффективность работы солнечных батарей в реальных режимах эксплуатации. *Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2015;3(326):58–62. EDN: TSXNHT. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23438495_82878854.pdf (дата обращения: 15.07.2023).
5. Джумаев А.Я. Анализ влияния температуры на рабочий режим фотоэлектрической солнечной станции. *Технические науки – от теории к практике: сборник статей по материалам 46-й международной научно-практической конференции*. Новосибирск: Сибак, 2015. 2015;5(42):33–40. EDN: TWOZVD. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23606313_35862862.pdf (дата обращения 15.07.2023).
6. Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б. Построение энергетических характеристик солнечных модулей с учетом условий окружающей среды. *Вестник Пермского государственного технического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2020;(34):56–74. EDN: FZIWGM. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_43803124_89485757.pdf (дата обращения 15.07.2023).
7. Mohamed Sharaf, Mohamed S. Yousef, Ahmed S. Huzayyin. Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29(18):26131–26159. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18719-9>
8. Ibtisam Ahmed Hasan, Iman Saleh, Kareem Duha, Adil Attar. Effect of evaporative cooling combined with heat sink on pv module performance. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences. Electro mechanical Engineering Department University of Technology Baghdad, Iraq*. 2019;(27)2:252–254. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23413.42728>
9. Mehrotra S., Rawat P., Debbarma M., Sudhakar K. Performance of a solar panel with water immersion cooling technique. *International Journal of Science, Environment ISSN 2278-3687 (O) and Technology*. 2014;3(3):1161–1172. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/263448324> (accessed: 15.07.2023).
10. Irwan Y.M., Leow W.Z., Irwanto M. et al. Indoor test performance of PV panel through water cooling method. *Energy Procedia*. 2015;79:604–611. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.540>
11. Leow Wai Zhe, Mohd. Irwan Yusoff, Amelia Abd Razak, Muhammad Irwanto Misrun, Safwati Ibrahim, Muhammad Izuan Fahmi, Afifah Shuhada Rosmi. Effect of Water Cooling Temperature on Photovoltaic Panel Performance by Using Computational Fluid. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2019;56(1):133–146. Available at: https://www.akademiabaru.com/doc/ARFMTSV56_N1_P133_146.pdf (accessed: 15.07.2023).
12. Benato A., Stoppato, A. An Experimental Investigation of a Novel Low-Cost Photovoltaic Panel Active Cooling System. *Energies*. 2019;12(8):1448. <https://doi.org/10.3390/en12081448>
13. Зайнутдинова Л.Х., Ильичев В.Г., Джамбеков Р.Г. Экспериментальное исследование нагрева фотоэлектрического модуля Ргамас-125. *Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики: сборник трудов российской конференции, 21-23 ноября 2022 г., Санкт-Петербург*. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С. 99–100. ISBN 978-5-7422-7926-6. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id22-248>
14. Faes A., Despeisse M., Levrat J. et al. SmartWire Solar Cell Interconnection Technology. *29-th EU PVSEC*. 2014. P.2555-2561 (2014). <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20142014-5DO.16.3>

15. Братышев С.Н., Зайнутдинова Л.Х., Ильичев В.Г., Титов А.С. Информационно-измерительная система долгосрочного мониторинга характеристик фотоэлектрических модулей. *Проблемы получения, обработки и передачи измерительной информации: материалы II Международной научно-технической конференции. Уфимский государственный авиационный технический университет*. Уфа: РИК УГАТУ, 2019. С.281–286. EDN: MFRINH. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_41446854_91814858.pdf (дата обращения: 15.07.2023).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Ильичев В.Г. – разработка системы охлаждения фотоэлектрических модулей, проведение эксперимента, обработка результатов эксперимента;

Зайнутдинова Л.Х. – разработка концепции сравнительного эксперимента и оценки энергоэффективности фотоэлектрических модулей, проведение эксперимента, оформление текста статьи;

Теруков Е.И. – разработка требований к конструкции фотоэлектрических модулей на основе кремниевых гетероструктурных (HJT) солнечных ячеек;

Михайлов М.Ю. – разработка технологии и изготовление фотоэлектрических модулей, на основе кремниевых гетероструктурных (HJT) солнечных ячеек.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Без дополнительного финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Владимир Геннадьевич Ильичев, младший научный сотрудник, Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева, г. Астрахань, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2579-0403>

e-mail: vova201428@yandex.ru

Лариса Хасановна Зайнутдинова, кандидат технических наук, доктор педагогических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева, г. Астрахань, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7013-9716>

e-mail: Lzain@mail.ru

Теруков Евгений Иванович, доктор технических наук, заместитель генерального директора по научным вопросам, ООО «Научно-технический центр тонкопленочных технологий в энергетике», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4818-4924>

e-mail: e.terukov@hevelsolar.com

Михайлов Михаил Юрьевич, технолог, ООО «Научно-технический центр тонкопленочных технологий в энергетике», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

e-mail: m.mikhailov@hevelsolar.com

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Ilyichev V.G. – development of a cooling system for photovoltaic modules, experiment, processing of experimental results;

Zainutdinova L.H. – development of the concept of a comparative experiment and assessment of the energy efficiency of photovoltaic modules, conducting an experiment, drafting the text of the article;

Terukov E.I. – development of requirements for the design of photovoltaic modules based on silicon heterostructural (HJT) solar cells;

Mikhailov M.Yu. – development of technology and manufacture of photovoltaic modules based on silicon heterostructured (HJT) solar cells.

FUNDING:

No additional funding.

CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare no conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Vladimir G. Ilyichev, research associate, Astrakhan Tatishchev State University, Astrakhan, Astrakhan region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2579-0403>

e-mail: vova201428@yandex.ru

Larisa Kh. Zainutdinova, Cand. Sci. (Eng.), Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Lead Researcher, Astrakhan Tatishchev State University, Astrakhan, Astrakhan region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7013-9716>

e-mail: Lzain@mail.ru

Evgenii I. Terukov, Doctor of Technical Sciences, Deputy director for science, R&D Center of Thin Film Technologies in Energetics, St. Petersburg, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4818-4924>

e-mail: e.terukov@hevelsolar.com

Mikhail Yu. Mikhailov process engineer, R&D Center of Thin Film Technologies in Energetics, St. Petersburg, Russian Federation.

e-mail: m.mikhailov@hevelsolar.com

Поступила в редакцию 04.10.2023

После доработки 24.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

Received 04.10.2023

Revision 24.11.2023

Accepted 30.11.2023

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 621.791.03

<https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-03>

EDN HSMYWQ



Оперативное определение вольтамперных характеристик
сварочных источников питания в атомном машиностроении

В.А. Винныйчук¹  , Н.Н. Подрезов¹ , Ю.В. Доронин² 

¹ Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Россия

² Аттестационный центр городского хозяйства, г. Москва, Россия

✉ VAVinniichuk@mephi.ru

Аннотация. Сварочное оборудование повсеместно оснащается современными цифровыми системами питания сварочной дуги на микропроцессорной и других логических элементных базах. Одновременно наблюдается тенденция к минимизации информации не только на китайское, но и на оборудование фирм известных брендов, поэтому важно оперативно отслеживать достоверность сопроводительной документации, во избежание ухудшения качества производимой продукции и траты времени переоборудование. Современные регистраторы сварочных процессов позволяют в несколько раз сократить время проверки заявленных характеристик всех источников питания, аттестованных для использования в атомной энергетике. Среди характеристик и сервисных функций, анализируемых регистратором, следует отметить статические вольтамперные характеристики, осциллограммы «горячего старта», «форсажа» и «антистикинга». В работе приведены данные выборочных испытаний на соответствие заявленным паспортным данным инверторных источников питания ИНЭМ-200Т (ММА процесс), Artsen CM-500 (MAG процесс) и ИОН 48-900 (SAW процесс). По результатам проведенных исследований сделаны выводы о пользе использования предложенной модели регистратора сварочных процессов на предприятиях тяжелого атомного машиностроения.

Ключевые слова: регистратор сварочных процессов, система питания сварочной дуги, источник питания, электронный балластник, нагрузочная характеристика, статическая вольт-амперная характеристика, динамическая вольт – амперная характеристика, MMA процесс, MAG процесс, Pulse SAW процесс.

Для цитирования: Винныйчук В.А., Подрезов Н.Н., Доронин Ю.В. Оперативное определение вольтамперных характеристик сварочных источников питания. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(3):22–26. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-03>

For citation: Vinniichuk V.A., Podrezov N.N., Doronin Yu.V. Operational determination of current-voltage characteristics of welding power sources in nuclear engineering. *Global nuclear safety*. 2023;13(3):22–26 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-03>

Operational determination of current-voltage characteristics welding power sources
in nuclear engineering

Vitaliy A. Vinniichuk¹  , Nikolay N. Podrezov¹ , Yuriy V. Doronin² 

¹ Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russia

² Certification Moscow Center of municipal services, Moscow, Russia

✉ VAVinniichuk@mephi.ru

Abstract. Welding equipment is everywhere equipped with modern digital welding arc power systems based on microprocessor and other logical element bases. At the same time, there is a tendency to minimize information not only for Chinese, but also for equipment of well-known brands, so it is important to quickly monitor the accuracy of the accompanying documentation in order to avoid deterioration in the quality of products and waste of time re-equipment. Modern recorders of welding processes allow several times to reduce the time for checking the declared characteristics of all power sources certified for use in the nuclear power industry. Among the characteristics and service functions analyzed by the recorder, it should be noted static current-voltage characteristics, oscillograms of «hot start», «afterburner» and «anti-sticking». The paper presents the data of selective tests for compliance with the declared passport data of inverter power supplies INEM-200T (MMA process), Artsen CM-500 (MAG process) and ION 48-900 (SAW process). Based on the results of the research, conclusions were drawn about the benefits of using the proposed model of the welding process recorder at enterprises of heavy nuclear engineering.

Keywords: welding process recorder, welding arc power system, power source, electronic ballast, load characteristic, static current-voltage characteristic, dynamic volt-ampere characteristic, MMA process, MAG process, SAW process.

К настоящему времени сварочное оборудование повсеместно оснащается современными цифровыми системами питания сварочной дуги на микропроцессорной и других логических элементных базах, что заметно расширяет технологические возможности оборудования [1-4]. Так же наблюдается тенденция к минимизации информации на оборудование фирм известных брендов, поэтому важно вовремя и оперативно отслеживать достоверность сопроводительной документации. В данной работе выполнено выборочное оперативное тестирование и проверка статических вольтамперных характеристик (ВАХ) источников питания (ИП) для ручной дуговой сварки ИНЭМ-200Т (Россия), в сварочном аппарате для механизированной сварки МEGMEET Artsen CM-500 (Китай) и российском источнике питания для автоматической сварки под слоем флюса [5] ИОН 48-900. Определение свойств источников питания (ИП), в т.ч. определение статических вольт-амперных характеристик (ВАХ) выполняли на регистраторе сварочных процессов ИНЭМ-ЭКСПЕРТ, разработанном фирмой ООО «Электронмаш-Систем», (рис.1).



Рисунок 1. Сварочный регистратор ИНЭМ-ЭКСПЕРТ
Figure 1. Recorder of welding processes INEM-EXPERT

Регистратор необходим для определения и анализа сварочно-технологических свойств источников питания постоянного и переменного тока, предназначенных для электродуговой сварки, а именно [6]:

- измерения статических вольтамперных характеристик (ВАХ) сварочных источников с выходным током до 500А и напряжением холостого хода не превышающим 180В;

- записи и анализа осциллограмм «горячего старта», «форсажа» и «антистикинга»;

- осциллографирования процессов сварки;

- измерения параметров питающей сети и др.

В состав регистратора входят:

- встроенный охлаждаемый электронно-управляемый балластный реостат, который изолирован от корпуса теплоизоляцией и выводит тепло в гофрированный рукав;

- управляемый трехступенчатый имитатор входной сети (160в, 220в, 280в);

- двухканальная автоматизированная система сбора информации (сварочные ток, сварочное напряжение, напряжение на входе тестируемого источника

и его потребление от сети) и управления балластным реостатом и имитатором сети;

- специализированный вычислитель с экраном, клавиатурой и мышью.

При выборе оборудования для обеспечения процесса сварки конкретных конструкций следует учитывать технические возможности применения конкретных источников питания, их вероятное поведение в сварочных контурах исследуемых процессов.

Известно, что качество сварных соединений металлоконструкций во многом обусловлено сварочно-технологическими требованиями к ИП на всех стадиях их работы: при зажигании дуги, ведении сварочного процесса и его окончании. Например, при низких показателях надёжности зажигания и устойчивости процесса сварки, дуга горит с частыми и длительными перерывами. Что приводит к образованию сварных соединений с непроварами, подрезами, различными включениями и другими дефектами. Для оптимального управления процессами сварки необходимо знать и обеспечивать оптимальные текущие параметры режима с учетом требований каждой стадии процесса. Таким образом, ИП – основной инструмент управления процессами сварки.

На первом этапе исследовали ВАХ программируемого источника ИНЭМ-200Т, которая представляет из себя совокупность Z-образных характеристик [7], одна из которых приведена на рисунке 2.

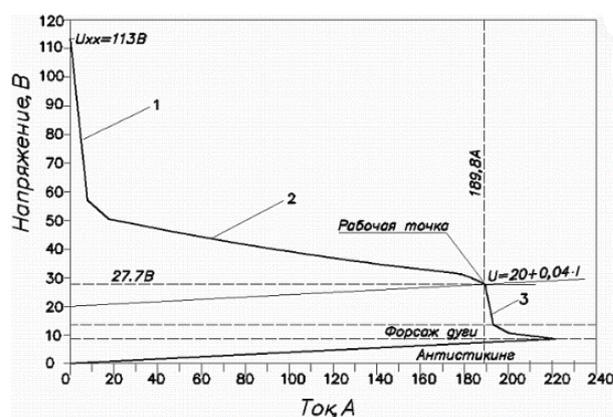


Рисунок 2. Статическая ВАХ ИП ИНЭМ-200Т при заданном $I_z = 200A$, рабочая точка $I = 189,8A$; $U = 27,7 В$, участки ВАХ: 1 – подпитки (задания U_{xx}); 2 – пологопадающий; 3 – рабочий для MMA процесса

Figure 2. Static CVC of IP INEM-200T at a given $I_z = 200A$, operating point $I = 189,8A$; $U = 27,7 V$, sections of the CVC: 1 – recharge (tasks U_{xx}); 2 – gently dipping; 3 – operating for MMA process

Анализ типовой статической ВАХ ИП ИНЭМ-200Т при заданном $I_z = 200A$, рабочая точка $I = 189,8A$ приведен в таблице 1.

Статическая внешняя ВАХ, предназначенной для реализации MAG процесса на одном из режимов сварки инверторной системы питания Artsen CM-500 представлено на рисунке 3.

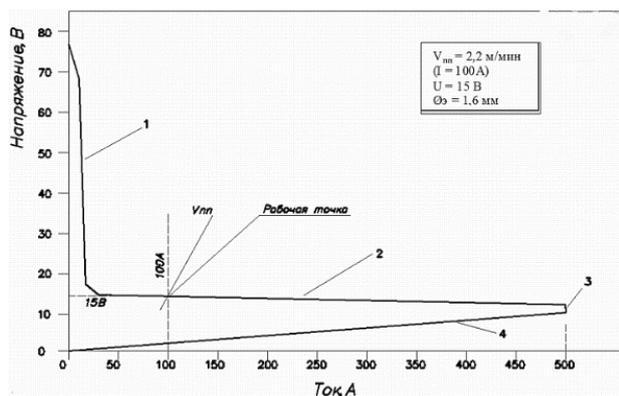


Рисунок 3. Статическая ВАХ ИП ARTSEN CM-500 при заданном режиме MAG – сварки, участки ВАХ: 1 – подпитки (задания U_{xx}); 2 – жесткий (рабочий для MAG); 3 – отсечки по току 500А; 4 – функция Antistick, V_{pp} – скорость подачи проволоки

Figure 3. Static I-V characteristic of SP ARTSEN CM-500 at a given mode MAG - welding, CVC sections: 1 - make-up (tasks U_{xx}); 2 - hard (working for MAG); 3 - cutoff current 500A; 4 - Antistick function, V_{pp} – wire feed speed

С помощью программного обеспечения регистратора возможно проводить испытания при различных параметрах режима с определением необходимых характеристик. Кроме того, выполняется автоматическое измерение энергетических параметров при испытании сварочно-технологических свойств ИП. Анализ типовой статической ВАХ ИП ARTSEN CM-500 приведен в таблице 2.

В результате оперативной проверки статических ВАХ ИП установлено, что паспортные данные иссле-

дованных систем питания сварочной дуги соответствуют действительности.

Экспериментально определенное семейство статических ВАХ ИП ИОН 48-700 представлено на рисунке 4. Анализ типовых участков семейства статических ВАХ ИП ИОН 48-900 для рабочей точки 39,6В/491,2А приведен в таблице 3.

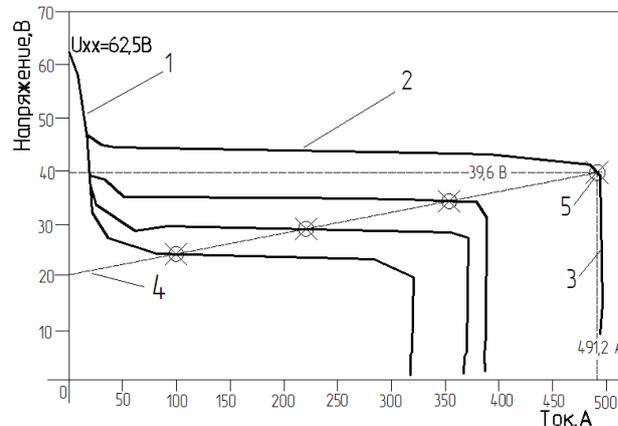


Рисунок 4. Семейство статических ВАХ ИП ИОН 48-900: 1 – участок подпитки (задания U_{xx}); 2 – рабочий участок SAW; 3 – отсечка по току («штыковой» участок); 4 – нагрузочная прямая; 5 – рабочая точка $U = 39,6$ В $I = 491,2$ А

Figure 4. Family of static I-V characteristics of IP ION 48-900: 1 - make-up section (tasks U_{xx}); 2 - working area SAW; 3 - current cutoff («bayonet» section); 4 - load line; 5 - operating point $U = 39.6$ V $I = 491.2$ A

Таблица 1. Анализ статической ВАХ ИП ИНЭМ-200Т

Table 1. Analysis of static VAC IP ARTSEN CM-500

№ уч.	Границы участка, напряжение, В / ток, А	Характеристика участка
1	113-50В/0-20А	Участок подпитки и задания напряжения холостого хода $U_{xx} = 113$ В, кроме того создаются условия MMA процесса для неквалифицированных сварщиков, позволяющие легко удерживать длинную дугу.
2	50-27,7В/20-189,8А	Пологопадающий участок
3	27,7-0В/220-0А	Обеспечивает наличие сервисных функций, улучшающих качество сварки и повышающих безопасность сварочных работ: «горячий старт» (Hotstart), «антиприлипание» (Antistick), «форсаж дуги» (Arcforce).

Примечание. ИНЭМ-200Т хорошо реагирует на просадку сетевого питания и «держит» режимы, как установлено, вплоть до падения сетевого напряжения до 165 В. Отмечается отсутствие устройства снижения напряжения (VRD) – понижения напряжения холостого хода источника до безопасных для человека 9-12 В, когда аппарат включен, но сварка не производится.

Таблица 2. Анализ статической ВАХ ИП ARTSEN CM-500

Table 2. Analysis of static VAC IP ARTSEN CM-500

№ уч.	Границы участка, напряжение, В / ток, А	Характеристика участка
1	77-15В/0-40А	Участок подпитки
2	≈15В/40-500А	Наклон рабочих участков 2 (дифференциальное сопротивление ИП) находится в пределах – 0,005...0,01В/А, что по классификации ГОСТ Р МЭК 60974-1-2012 относится к жестким характеристикам.
3	≈15В/500А	Участок 3 защищает ИП от перегрева, величина тока на нем может устанавливаться программно.
4	≈15-0В/500-0А	Участок 4 предназначен для борьбы с возможными короткими замыканиями в процессе MAG – сварки.

Примечание. Установлено, что семейство настраиваемых ВАХ находится в заявленном по паспортным данным диапазоне регулирования по напряжению сварки 15,5-39В. Напряжение холостого хода (U_{xx}) составляет 77 В, В регуляторе системы питания Artsen CM-500 предусмотрен ряд синергетических программных функций [8]: – система питания устанавливает напряжение в зависимости от скорости подачи электродной проволоки V_{pp} (рис. 3), т.е. сварочного тока [9]; – регулирование индуктивности для сглаживания пульсаций и уменьшения разбрызгивания производится в электронном режиме и т.п.

Таблица 3. Анализ типовых участков семейства статических ВАХ ИП ИОН 48-900

Table 3. Analysis of typical sections of the static VAC family IP ION 48-900

№ уч.	Границы участка, напряжение, В / ток, А	Характеристика участка
1	62,5-46В/0-35А	Участок подпитки и задания напряжения холостого хода
2	≈40-39,6В/35-491,2А	Наклон рабочего участка поз. 2 (дифференциальное сопротивление ИП) рисунка 4, находится в пределах - 0,005...0,015В/А, что по классификации ГОСТ Р МЭК 60974-1 относится к жестким характеристикам.
3	≈39,6-10В/491,2А	Участок поз. 3 -штыковая характеристика, защищает ИП от перегрева, величина тока на нем устанавливается программно.
4	≈20-39,6В/0-491,2А	Нагрузочная прямая поз. 4 (стандартное напряжение нагрузки) задавали электронным реостатом по зависимости $U_2 = 20 + 0,04 \cdot I_2 \leq 600\text{А}$.
<p><i>Примечание.</i> Напряжение холостого хода ($U_{хх}$) ИП составляет 62,5 В. Сравнительно низкое напряжение холостого хода компенсируется набросом тока в момент зажигания дуги, наподобие сервисной функции «горячий старт» (Hotstart), обычно применяемой в аппаратах для реализации ММА-процесса. Пересечение нагрузочной прямой поз. 4 с каждым рабочим участком ВАХ поз. 2 формирует семейство рабочих точек (четыре на рисунке 4) электрических режимов SAW-процесса поз.5. Установлено также, что семейство настраиваемых ВАХ находится в заявленном по паспортным данным диапазоне регулирования по напряжению сварки 20,5-48В, а максимальная активная мощность, снимаемая с выходных клемм ИП составляет 30...33 кВт.</p>		

В результате исследования оперативно подтверждены основные сервисные функции и сварочно-технологические свойства источников питания для ручной дуговой сварки ИНЭМ-200Т, механизированной сварки Artsen CM-500, автоматической сварки под слоем флюса ИОН 48-900. Экспериментально определены статические ВАХ указанных систем питания. Применение информационно-измерительной

системы ИНЭМ-ЭКСПЕРТ позволило в несколько раз ускорить процесс проверки паспортных данных ИП и построения статических ВАХ, что очень важно для современных технологических процессов атомного машиностроения. Есть возможность определения в оперативном порядке динамических вольт-амперных характеристик по записям осциллограмм тока и напряжения при сварке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ленивкин В.А., Дюргеров Н.Г., Даровской Г.В., Авакян А.А. Программирование процессов дуговой сварки в защитных газах. *Сварка и диагностика*. 2017;3:24–29. Режим доступа: <http://svarka.naks.ru/archive/issue/detail.php?ID=540871749> (дата обращения: 02.05.2023).
2. Сараев Ю.Н., Семенчук В.М., Непомнящий А.С., Лунев А.Г., Григорьева А.А. Исследование влияния динамических свойств источника питания на стабильность тепломаппереноса при дуговой сварке плавящимся электродом в среде CO₂ с короткими замыканиями дугового промежутка. *Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии. Тезисы докладов. Томск, 05–09 октября 2020 года*. Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2020. С. 355–356. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44088144> (дата обращения: 02.05.2023).
3. Патон Б.Е., Лебедев В.К. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. Москва: Машгиз, 1966. 359 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/record/01006477695> (дата обращения: 15.05.2023).
4. Zhao Y., Chung H. Influence of power source dynamics on metal and heat transfer behaviors in pulsed gas metal arc welding. *International journal of heat and mass transfer*. 2018;121:887–899. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.058>
5. Судник В.А., Ерофеев В.А., Масленников А.В., Цвелев Р.В. Моделирование процесса дуговой сварки под флюсом, исследование влияния напряжения дуги и диаметра электрода. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2015. Вып. 6. Ч. 2. С. 12–21. Режим доступа: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/file/tsu_izv_technical_sciences_2015_06_part_2.pdf (дата обращения: 02.05.2023).
6. Чернов А.В. *Обработка информации в системах контроля и управления сварочным производством*. Монография. Новочеркасский государственный технический университет. Новочеркасск: НГТУ, 1995. 180 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/record/01001729345> (дата обращения: 17.05.2023).
7. Коновалов Ю.Н. Сравнение свойств универсального инверторного источника питания сварочной дуги МАГМА-315 и традиционных выпрямителей для механизированной сварки. *Сварочное производство*. 2013;4:23–27. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_11725159_41585366.pdf (дата обращения: 17.05.2023).
8. Сараев Ю.Н., Чинахов Д.А., Ильященко Д.П., Киселев А.С., Гордынец А.С. Исследование стабильности плавления и переноса электродного металла в процессе дуговой сварки плавящимся электродом от источников питания с различными динамическими характеристиками. *Сварочное производство*. 2016;12:3–10. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29290069> (дата обращения: 17.05.2023).
9. Lenivkin V.A., Kiselev D.V., Dyurgerov N.G. Pulsed arc welding with intermittent spray metal transfer by rectangular pulses. *Welding International*. 2017;(31)4:303–306. <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1257242>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Винныйчук В.А. – разработка методической части исследований, организация и выполнение экспериментальных работ;

Подрезов Н.Н. – научное руководство проектом, обработка и анализ экспериментальных данных, подготовка заключения и результатов исследования к опубликованию;

Доронин Ю.В. – ресурсное обеспечение экспериментального исследования, участие в экспериментах.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Виталий Александрович Винныйчук, инженер кафедры машиностроения и прикладной механики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»; г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2764-7530>

e-mail: VAVinniichuk@mephi.ru

Николай Николаевич Подрезов, к.т.н., доцент кафедры машиностроения и прикладной механики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»; г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0314-2413>

e-mail: VAVinniichuk@mephi.ru

Юрий Викторович Доронин, д.т.н., профессор, заместитель руководителя Аттестационного центра городского хозяйства, г. Москва, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3294-882X>

e-mail: VAVinniichuk@mephi.ru

Поступила в редакцию 11.09.2023

После доработки 25.10.2023

Принята к публикации 31.10.2023

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Vinniychuk V.A. – development of the methodological part of the research, organization and implementation of experimental work;

Podrezov N.N. – scientific research supervision, processing and analysis of experimental data, preparation of a conclusion and research results for publication;

Doronin Yu.V. – resource support for experimental research, participation in experiments.

FUNDING:

The study was carried out without external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflicts of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Vitaliy A. Vinniychuk, engineer, Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2764-7530>

e-mail: VAVinniichuk@mephi.ru

Nikolay N. Podrezov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0314-2413>

e-mail: NNPodrezov@mephi.ru

Yuriy V. Doronin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of the Attestation Center for City Services, Moscow, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3294-882X>

e-mail: ac-mosgaz@yandex.ru ; acgh@naks.ru

Received 11.09.2023

Revision 25.10.2023

Accepted 31.10.2023

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 621.791

<https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-04>

EDN LPPYEL



Обоснование получения мелкозернистой структуры сварных соединений при высокоинтенсивном импульсном воздействии на сварочный контур

С.М. Бурдаков  , В.И. Ратушный , Ю.В. Заяров 

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Россия

 SMBurdakov@mephi.ru

Аннотация. Эффективным методом повышения надежности эксплуатации объектов тепловой и атомной энергетики является повышение качества изготовления, монтажа и ремонта их теплового и генерирующего энергетического оборудования. Одним из путей улучшения качества, технологических и служебных свойств сварных соединений в процессе их выполнения является влияние на структуру кристаллизующегося металла тепловым, электрическим высокоинтенсивным импульсным воздействием для ее измельчения. В настоящей работе предлагаются результаты экспериментального исследования по обоснованию мелкозернистой структуры сварных соединений, полученных с помощью ручной дуговой сварки покрытыми электродами при высокоинтенсивном импульсном воздействии (QPS) частотой $f_{и.г.} = 40 \cdot 10^3$ Гц, напряжением $U_{и.г.} = 80,0$ В, на сварочный контур. Для оценки влияния высокоинтенсивного импульсного воздействия на сварочный контур, включая плазму дугового разряда и структуру получаемого шва можно воспользоваться энергетическими характеристиками процесса. В качестве энергетических характеристик сварочного процесса были выбраны сварочный ток $I_{св.пр.}$, напряжение на дуговом разряде $U_{д.пр.}$, мощность $P_{пр.}$. Были получены осциллограммы указанных характеристик, а также определены значения максимального импульсного значения мощности, выделяемой в сварочном контуре при воздействии на него QPS и без его применения. Выполнена энергетическая оценка ввода дополнительного высокоинтенсивного импульсного воздействия на сварочный контур как ультразвуковой энергии для кавитации поверхностного слоя сварочной ванны при QPS. Дуговой разряд постоянного тока при наложении на него высокоинтенсивного импульсного воздействия частотой $f_{и.г.} = 40 \cdot 10^3$ Гц (QPS) является источником кавитации жидкой фазы металла сварочной ванны в ограниченном поверхностном слое заданной толщины. Можно предположить, что кристаллизация ванны идет слоями при воздействии на сварочный контур высокоинтенсивного импульсного воздействия частотой $f_{и.г.} = 40 \cdot 10^3$ Гц (QPS). При этом происходит надлом растущих кристаллов при колебаниях жидкой фазы за счет сил трения, возникающих между движущейся жидкой фазой и растущим кристаллом. В месте надлома кристалла образуются зоны динамически переохлажденного металла, что ведет к появлению новых центров кристаллизации, возникает мелкозернистая структура сварного шва.

Ключевые слова: тепловое и генерирующее энергетическое оборудование, объекты тепловой и атомной энергетики, энергетическое оборудование, технологические и служебные свойства, сварные соединения, ручная дуговая сварка, сварочный процесс, качество сварных соединений, высокоинтенсивное импульсное воздействие (QPS), мелкозернистая структура, сварочный контур, ультразвук, кавитация, покрытый электрод, жидкая фаза.

Для цитирования: Бурдаков С.М., Ратушный В.И., Заяров Ю.В. Обоснование получения мелкозернистой структуры сварных соединений при высокоинтенсивном импульсном воздействии на сварочный контур. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(4):27–31. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-04>

For citation: Burdakov S.M., Ratushny V.I., Zayarov Yu.V. Justification of obtaining a fine-grained structure of welded joints under high-intensity pulsed action on the welding circuit. *Global Nuclear Safety*. 2023;(1):27–31 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-04>

Justification of obtaining fine-grained structure of welded joints at high-intensity impulse effect on welding circuit

Sergey M. Burdakov  , Viktor I. Ratushny , Yrii V. Zayarov 

Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia

 SMBurdakov@mephi.ru

Abstract. An effective method of improving the reliability of operation of thermal and nuclear power facilities is to improve the quality of manufacture, installation and repair of their thermal and generating power equipment. One of the ways to improve the quality, technological and service properties of welded joints in the process of their implementation is to influence the structure of the crystallizing metal by thermal, electric high-intensity impulse effect for its grinding. This work proposes the results of an experimental study to substantiate the production of a fine-grained structure of welded joints obtained using manual arc welding with coated electrodes at a high-intensity impulse effect (QPS) with a $f_{i.g.} = 40 \cdot 10^3$ Gts frequency, voltage $U_{i.g.} = 80.0$ V, on the welding circuit. The energy characteristics of the process can be used to assess the effect of high-intensity impulse action on the welding circuit, including the arc plasma and the structure of the resulting weld. As the energy characteristics of the welding process, the welding current I_{wd} , the voltage on the arc discharge U_d , the power R_p . Oscillograms of the specified characteristics were obtained, as well as the values of the maximum (peak) and average power released in the welding circuit when QPS is exposed to it and without its use were determined. Energy evaluation of input of additional high-intensity pulse effect on welding circuit as ultrasonic energy for cavitations of surface layer of welding bath at QPS was performed. Direct current arc discharge at application of high-intensity pulse effect with frequency of $f_{i.g.} = 40 \cdot 10^3$ Gts (QPS) is source of cavitations of liquid phase of metal of welding bath in limited surface layer of preset thickness. It can be assumed that the crystallization of the bath takes place in layers when the welding circuit is subjected to high-intensity pulse exposure with a frequency of $f_{i.g.} = 40 \cdot 10^3$ Gts (QPS). In this case, the growing crystals break when the liquid phase oscillates due to friction forces arising between the moving liquid phase and the growing crystal. At the site of crystal fracture, zones of dynamically super cooled metal are formed, which leads to the appearance of new crystallization centers, and a fine-grained structure of the weld appears.

Keywords: thermal and generating power equipment, thermal and nuclear power facilities, power equipment, process and service properties, welded joints, manual arc welding, welding process, quality of welded joints, high-intensity impulse effect (QPS), fine-grained structure, welding circuit, ultrasound, cavitations, coated electrode, liquid phase.

Эффективным методом повышения надежности эксплуатации объектов тепловой и атомной энергетики является повышение качества изготовления, монтажа и ремонта их теплового и генерирующего энергетического оборудования.

Следует отметить, что главенствующую роль в улучшении качества данного энергетического оборудования играет уровень технологических и служебных свойств сварных соединений, особенно выполняемых ручной дуговой сваркой.

При этом имеют место следующие специфические особенности такие как, трудный доступ к местам ведения сварочного процесса, конфигурация требуемых к выполнению соединений, влияние окружающей среды. Возникновение этих факторов может способствовать, прерыванию процесса сварки, снижению технологических и служебных свойств сварных соединений, в том числе значений ударной вязкости, устойчивости дугового разряда и возникновению дефектов. Для восстановления требуемого качества сварных соединений обычно применяется выборка дефектного участка и повторное выполнение сварочного процесса на данном участке, что, как правило, ведет к повышению стоимости такой ремонтной работы и возможному снижению эксплуатационной надежности изготавливаемого или обслуживаемого оборудования [1, 2].

Одним из путей улучшения качества, технологических и служебных свойств сварных соединений в процессе их выполнения является влияние на структуру кристаллизующегося металла тепловым, электрическим высокоинтенсивным импульсным воздействием для ее измельчения.

Известно положительное действие на измельчение структуры шва за счет управляемого, электрического, высокоинтенсивного импульсного воздействия повышенной частоты ($U_{и.г.} = 80,0$ В, $f_{и.г.} = 40 \cdot 10^3$ Гц) от специализированного генератора-источника питания (QPS) на сварочный контур при параллельном его

подключении с основному источнику питания (ВДУ-504). [3-5].

Формирование мелкозернистой структуры металла шва околосшовной зоны является одним из условий получения сварных соединений с высокими технологическими и служебными характеристиками [5, 6].

Для выявления мелкозернистой структуры в металле сварного шва в работе [4] проводились металлографические исследования на образцах, вырезанных из средней части объема единичных валиков, выполненных по базовой технологии ручной дуговой сварки покрытыми электродами (ТМЛ-3У) и предлагаемой технологии при высокоинтенсивном импульсном воздействии на сварочный контур ($U_{и.г.} = 80,0$ В, $f_{и.г.} = 40 \cdot 10^3$ Гц, $I_{св} = 100$ А) на дуговой разряд и сварочный контур. В данных работах [4, 7] была исследована микроструктура зон столбчатых и равноосных дендритов, а также микроструктура зоны термического влияния и линии сплавления. Было получено, что размер равноосных зерен зоны термического влияния у линии сплавления при базовом варианте (без QPS) больше (эталонный номер зерна $G_3 = 1$, средний диаметр зерна $d_m = 0,250$ мм, средняя площадь зерна $a = 0,06250$ мм²), чем по предлагаемой технологии (с QPS) (эталонный номер зерна $G_3 = 2$, средний диаметр зерна $d_m = 0,1770$ мм, средняя площадь зерна $a = 0,03120$ мм²) [4].

Так же в рамках работы [8] было показано положительное влияние мелкозернистой структуры сварного соединения на ударную вязкость металла сварного соединения.

Обоснование получения мелкозернистой структуры металла сварных соединений при высокоинтенсивном импульсном воздействии на сварочный контур и увеличения ударной вязкости в данном случае может быть объяснен следующим образом [5, 6].

Введение высокоинтенсивного импульсного воздействия в сварочный контур в жидкий металл ванны шва способствует гомогенному возникновению до-

полнительных центров кристаллизации. Дуговой разряд инициирует появление пульсирующего давления в поверхностном слое жидкой фазы объема ванны [10], что согласно принципу Ле-Шателье, приводит к увеличению равновесной температуры кристаллизации с образованием новых участков-центров, динамически переохлажденного металла. Возникновение новых центров кристаллизации за счет динамического переохлаждения может иметь место только при ультразвуковых колебаниях слоя металла в условиях кавитации. В данном случае источником ультразвуковых колебаний металла является дуговой разряд постоянного тока при наложении на него высокоинтенсивного импульсного воздействия ($U_{и.г.} = 80,0 \text{ В}$, $f_{и.г.} = 40 \cdot 10^3 \text{ Гц}$, $I_{св.} = 100 \text{ А}$). При этом так же происходит надлом растущих кристаллов при колебаниях жидкой фазы за счет сил трения, возникающих между движущейся жидкой фазой и растущим кристаллом. Результаты расчетов, отмеченные в работе [5] показали, что при частотах колебаний свыше $9 \cdot 10^3 \text{ Гц}$ силы трения достигают значений, которые превышают прочность растущего кристалла в жидкой фазе исследуемого слоя сварочной ванны. Следует так же отметить что на растущий кристалл, кроме сил трения, при движении жидкой фазы металла, действуют электромагнитные силы Лоренца. Проведенные расчеты напряжений изгиба в растущем кристалле с учетом силы Лоренца, что для существующего длины (l) и радиуса (r) сечения кристалла $l/r \leq 10$ эти напряжения на 2–3 порядка меньше внутрикристаллической прочности при температуре плавления. Эти факторы могут объяснить возможное измельчение кристаллов металла сварного шва при указанном высокоинтенсивном импульсном воздействии на сварочный контур и слой металла сварочной ванны в жидкой фазе [5].

Для оценки влияния высокоинтенсивного импульсного воздействия на сварочный контур, включая плазму дугового разряда и структуру получаемого шва можно воспользоваться энергетическими характеристиками процесса [9–11].

В качестве энергетических характеристик сварочного процесса были выбраны сварочный ток $I_{св.пр.}$, напряжение на дуговом разряде $U_{д.пр.}$, мощность $P_{пр.}$.

В рамках данной работы было выполнено осциллографирование в процессе укладки одиночного валика при процессе ручной дуговой сварки покрытыми электродами ТМЛ-3У $\varnothing 3,0 \text{ мм}$ с режимом $100,0 \text{ А}$ на основании методики проведения экспериментов данных в более ранних работах¹ [12]. Осуществлялся съем осциллограмм сварочного тока и напряжения в базовом варианте сварочного процесса, без подачи на сварочный контур высокоинтенсивного импульсного воздействия ($I_{св.пр.} = 100,0 \text{ А}$) (рис. 1а), и в предлагаемом варианте, с использованием отмеченного выше

воздействия (QPC) (Режим: $U_{и.г.} = 80,0 \text{ В}$, $f_{и.г.} = 40 \cdot 10^3 \text{ Гц}$, $I_{св.} = 100,0 \text{ А}$) (рис. 1б). Исходя из полученных данных, в составленной специализированной, исследовательской, программной среде для Mathcad©, были построены графики зависимости от времени $t = t_{пр.св.}$ мощности дугового разряда ($P_{пр.}$) базового (без использования (QPC)) и предлагаемого (с применением (QPC)) исследуемых процессов (рис. 2 а,б).

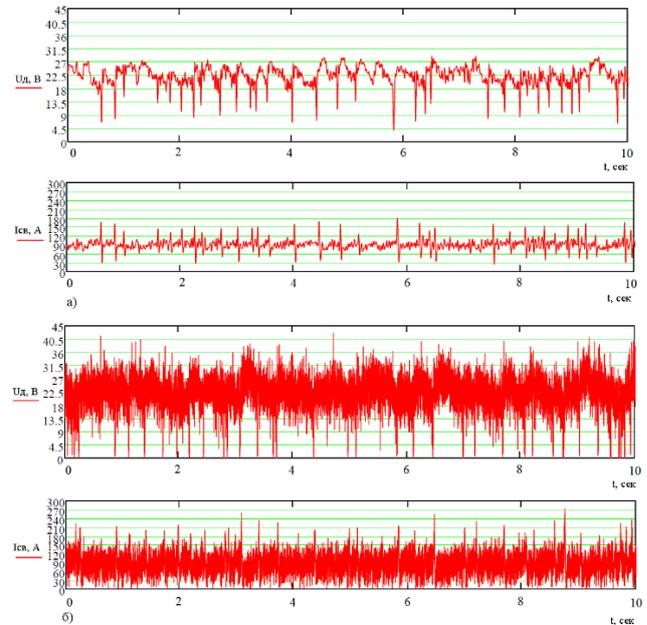


Рисунок 1. Осциллограммы тока и напряжения на дуге ($U_0 = U_{д.осцр.} \text{ В}$) в процессе сварки ($I_{св.} = I_{св.пр.} \text{ А}$) исходя из времени длительности измерения ($t = 10,00 \text{ сек}$):

а) $I_{св.} = I_{св.пр.} = 100,00 \text{ А}$ без (QPC);

б) $I_{св.} = I_{св.пр.} = 100,00 \text{ А}$ с (QPC) $f_{и.г.} = 40 \cdot 10^3 \text{ Гц}$

Figure 1. Oscillograms of current and voltage on the arc ($U_d = U_{d.oscr.} \text{ V}$) during welding ($I_{wd} = I_{wd.pr.} \text{ A}$) based on the measurement time ($t = 10,00 \text{ s}$): а) $I_{wd} = I_{wd.pr.} = 100,00 \text{ A}$ without (QPC); б) $I_{wd} = I_{wd.pr.} = 100,00 \text{ A}$ (QPC) $f_{i.g.} = 40 \cdot 10^3 \text{ Gts}$

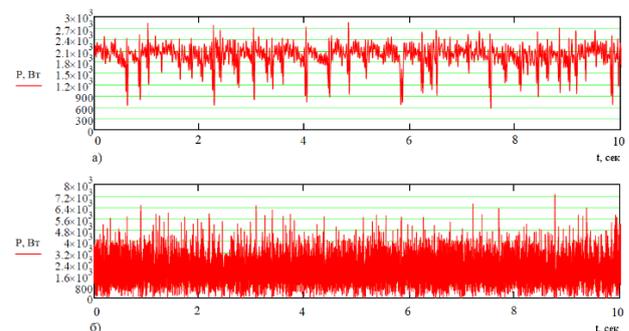


Рисунок 2. Графики зависимости мощности на дуге ($P = P_{пр.} \text{ Вт}$) в процессе сварки ($I_{св.} = I_{св.пр.} \text{ А}$) исходя из времени длительности измерения ($t = 10,00 \text{ сек}$):

а) $I_{св.} = I_{св.пр.} = 100,00 \text{ А}$ без (QPC); б) $I_{св.} = I_{св.пр.} = 100,00 \text{ А}$ с (QPC) $f_{и.г.} = 40 \cdot 10^3 \text{ Гц}$

Figure 2. Curves of power dependence on arc (P, W) during welding ($I_{wd} = I_{wd.pr.} \text{ A}$) based on measurement duration time ($t = 10,00 \text{ sec}$): а) $I_{wd} = I_{wd.pr.} = 100,00 \text{ A}$ without (QPC); б) $I_{wd} = I_{wd.pr.} = 100,00 \text{ A}$ (QPC) $f_{i.g.} = 40 \cdot 10^3 \text{ Gts}$

Для осуществленных вариантов проведения сварочного процесса без подачи на сварочный контур

¹ Бурдаков С.М. Экспериментальные исследования устойчивости горения сварочной дуги с использованием информационно-измерительной и управляющей системы. – Сборник докладов 5-й Международной научной-практической конференции «Качество науки – качество жизни», Тамбов, 26-27 февраля 2009 г. Тамбов: Центр Конференций ТГТУ, 2009. – С. 54.

высокоинтенсивного импульсного воздействия ($I_{\text{св.пр.}}=100,0$ А) и с его подачей (QPS): $U_{\text{н.г.}}=80,0$ В, $f_{\text{н.г.}}=40 \cdot 10^3$ Гц, $I_{\text{св.}}=100,0$ А), были получены следующие результаты по исследованию энергетической мощности соответственно $P_{\text{св.пр.баз}}$ и $P_{\text{св.пр.предлог}}$.

Максимальное импульсное значение мощности выделяемой в сварочном контуре: $P_{\text{св.пр.баз}}=2,843 \cdot 10^3$ Вт; $P_{\text{св.пр.предлог}}=7,284 \cdot 10^3$ Вт. При этом разность значений максимальных импульсных мощностей по базовой и предлагаемой технологии составляет: $\Delta_{\text{св.пр.макс}}=4,44 \cdot 10^3$ Вт. Полученные результаты могут быть объяснены особенностями протекания физических процессов ионизации и рекомбинации носителей заряда в плазме дуги, а так же влиянии на ее проводимость при воздействии (QPC) [13].

Исходя из полученных экспериментальных данных, была выполнена энергетическая оценка ввода дополнительного высокоинтенсивного импульсного воздействия на сварочный контур как ультразвуковой энергии для кавитации поверхностного слоя сварочной ванны при $f_{\text{н.г.}}=40 \cdot 10^3$ Гц. Максимальная мощность дополнительного воздействия может быть определена по формуле (1) [14], Дж/с:

$$W = 0,5 \cdot A^2 \cdot \omega^2 \cdot \rho \cdot c \cdot S, \quad (1)$$

где A – максимальная, заданная амплитуда пучности-возмущения жидкой фазы металла (на уровне размера кристалла $0,00002$ м [4]);

ω – угловая частота $\omega=2 \cdot \pi \cdot f_{\text{н.г.}}$ (251200 Гц);

$f_{\text{н.г.}}$ – частота колебаний, Гц;

ρ – плотность среды (для стали 7900 кг/м³);

c – скорость звука среды (для стали 5177 м/с);

$S=0,000014$ м² – площадь сечения поверхности сварного шва шириной 7 мм подверженного обработке (QPC).

Ввод энергии дополнительного высокоинтенсивного импульсного воздействия в виде ультразвуковых колебаний получается в виде выходной мощности специализированного генератора-источника питания W в Джоулях за $t=1$ сек. процесса:

$$W_{\text{us}} = W \cdot t. \quad (2)$$

Используя заданные значения параметров в формулах (1) и (2), получим оценку полезной вводимой в сварочную ванну ультразвуковой энергии от генератора-источника $W_{\text{us}}=7226$ Дж. Значение разности значений импульсных мощностей, по базовой и предлагаемой технологии согласуется с результатами расчета W_{us} и соответствует требуемому значению возникновения структурных изменений в сварном шве.

Можно сказать, что дуговой разряд постоянного тока при наложении на него высокоинтенсивного импульсного воздействия частотой $f_{\text{н.г.}}=40 \cdot 10^3$ Гц (QPS) является источником кавитации жидкой фазы металла сварочной ванны в ограниченном поверхностном слое заданной толщины. Можно предположить, что кристаллизация ванны идет слоями при воздействии на сварочный контур высокоинтенсивного импульсного воздействия частотой $f_{\text{н.г.}}=40 \cdot 10^3$ Гц (QPS), что согласуется с данными специалистов [15]. При этом происходит надлом растущих кристаллов при колебаниях жидкой фазы за счет сил трения, возникающих между движущейся жидкой фазой и растущим кристаллом, в ограниченной на уровне среднего диаметра зерна кристалла зоне. В месте надлома кристалла образуются новые зоны динамически переохлажденного металла, что ведет к появлению новых центров кристаллизации, возникает мелкозернистая структура сварного шва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Чернов А.В., Полетаев Ю.В., Кавришвили З.О., Бурдаков С.М. Повышение устойчивости горения дуги при сварке покрытыми электродами. Чернов А.В., Полетаев Ю.В., Кавришвили З.О., Бурдаков С.М. Повышение устойчивости горения дуги при сварке покрытыми электродами. *Сварочное производство*. 2000;(2):7–9. 2000;(2):7–9. Режим доступа: <https://bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=PRSV-svar/2000/2> (дата обращения: 25.08.2023).
2. Хромченко Ф.А. Надежность сварных соединений труб котлов и паропроводов. Москва: Энергоиздат, 1982. 120 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001115162> (дата обращения: 01.09.2023).
3. Бурдаков С.М., Орехов М.И. Анализ способов повышения и критериев оценки устойчивости сварочного дугового разряда. *Инженерный вестник Дона*. 2016;2. Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3594> (дата обращения: 25.08.2023).
4. Бурдаков С.М., Дамаскина М.Б., Желецкий Д.И. Исследование структуры металла сварных соединений при импульсном воздействии на дуговой разряд. *Глобальная ядерная безопасность*. 2021;11(1):38–43. <https://doi.org/10.26583/gns-2021-01-04>
5. Болдырев А.М. О механизме формирования структуры металла шва при введении низкочастотных колебаний в сварочную ванну. *Сварочное производство*. 1976;(2):52–55. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_3504267_1000650114/ (дата обращения: 01.09.2023).
6. Славин Г.А., Столпнер Е.А., Морозова Т.В., Маслова Н.Д., Хорошева В.Б. Управление процессом кристаллизации путем динамического воздействия дуги. *Сварочное производство*. 1974;(8):2–3. Режим доступа: <https://djvu.online/file/uYUmHfohtfC9j> (дата обращения: 01.09.2023).
7. Бурдаков С.М., Чернов А.В., Полетаев Ю.В., Полежаев С.В., Прокопенко В.В. Повышение устойчивости дугового разряда и качества соединений при сварке покрытыми электродами. *Новые методы теоретических и экспериментальных исследований материалов, приборов и технологий: сборник научных трудов Волгодонского института Новочеркасского государственного технического университета*. Новочеркасск: Набл, 2001. С. 111–115. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/004191_000025_DONPB-RU_DSPL_3027404/ (дата обращения: 25.08.2023).
8. Бурдаков С.М. Механизм повышения ударной вязкости соединений при импульсном воздействии на сварочный контур. *Глобальная ядерная безопасность*. 2016;7(3)20:51–56. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27382024> (дата обращения: 25.08.2023).

9. Букаров В.А., Ермаков С.С., Дорина Т.А. Оценка стабильности дуговой сварки по осциллограммам процесса с использованием статистических методов. *Сварочное производство*. 1990;(12):30–32. Режим доступа: <https://djvu.online/file/zovZ6Y5cqqdqt> (дата обращения: 01.09.2023).

10. Бурдаков С.М., Чернов А.В., Цуверкалова О.Ф., Зокиров К.Д. Управление газодинамическими характеристиками дугового разряда с помощью квазигармонической компоненты питания. *Безопасность ядерной энергетики: тезисы докладов XVI Международной научно-практической конференции, 12-13 ноября 2020 г.* Волгодонск: ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2020. С. 63–66. ISBN 978-5-72622472-5. Режим доступа: <https://nps.viti-mephi.ru/ru/arhiv-konferencii> (дата обращения: 01.09.2023).

11. Бурдаков С.М., Козловцев В.М. Исследование параметров дугового разряда с комбинированной системой питания. *Глобальная ядерная безопасность*. 2014;2(11):54–58. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22254712> (дата обращения: 01.09.2023).

12. Бурдаков С.М. Методы диагностики плазменно-дуговых процессов при импульсном воздействии на сварочный контур. *Альманах современной науки и образования*. 2014;11(89):41–45. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22265549> (дата обращения: 25.08.2023).

13. Burdakov S.M., Chernov A.V., Poletaev Y.V., Polezhaev S.V. Physical model of electric arc discharge with the application of high frequency voltage. *Welding International*. 2002;16(4):317–319. <https://doi.org/10.1080/09507110209549537>

14. Голямина И.П. Ультразвук. Москва: Советская энциклопедия, 1979. 400 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/eVdvBKuTNbN8W> (дата обращения: 01.09.2023).

15. Дюргерев Н.Г., Сагиров Х.Н., Ленивкин В.А. Оборудование для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 80 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/aPi0Asb8krza2> (дата обращения: 25.08.2023).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Бурдаков С.М. – разработка теории, оборудования, планирование и проведение экспериментов, расчетов, выполнение анализа результатов экспериментов, разработка программного обеспечения;

Ратушный В.И. – выполнение анализа результатов расчетов, статистический анализ физико-математической модели вычислений, создание рукописи статьи при поддержке С.М. Бурдакова;

Заяров Ю.В. – выполнение анализа результатов расчетов, руководство научно-исследовательской работой и проверка ее результатов.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии финансовой помощи при проведении исследования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Сергей Михайлович Бурдаков, к.т.н., доцент кафедры строительных производств, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»; г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8599-6008>

e-mail: SMBurdakov@mephi.ru

Виктор Иванович Ратушный, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физико-математических дисциплин, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»; г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5701-6279>

e-mail: VIRatushnyj@mephi.ru

Юрий Владимирович Заяров, к.т.н., заведующий кафедрой строительных производств, доцент кафедры строительных производств Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»; г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3353-8037>

e-mail: YVZayarov@mephi.ru

Поступила в редакцию 09.10.2023

После доработки 23.11.2023

Принята к публикации 28.11.2023

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Burdakov S.M. – development of theory, equipment, planning and conducting experiments, calculations, analysis of experimental results, software development;

Ratushny V.I. – analysis of calculation results, statistical analysis of physical and mathematical model of calculations, creation of article manuscript with S.M.Burdakov's support;

Zayarov Yu.V. – analysis of the results of calculations, management of research work and verification of its results.

FUNDING:

No funding was received by the authors to do the research.

CONFLICT OF INTEREST:

The author declares no conflicts of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Sergey M. Burdakov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of construction industries department, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8599-6008>

e-mail: SMBurdakov@mephi.ru

Viktor I. Ratushny, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Eng.), head of the department of physical and mathematical disciplines, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5701-6279>

e-mail: VIRatushnyj@mephi.ru

Yuriy V. Zayarov, Cand. Sci. (Eng.), head of the department of construction production associate, professor of construction industries department, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3353-8037>

e-mail: YVZayarov@mephi.ru

Received 09.10.2023

Revision 23.11.2023

Accepted 28.11.2023

УДК 621.18: 621.039.58: 621.311.25
<https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-05>
EDN SGEMEM



Оценка эффективной длины микротрещин, возникающих в водо-паропроводе при циклическом режиме работы парогенератора АЭС

А.П. Елохин  

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

 elokhin@yandex.ru

Аннотация. При эксплуатации водо-водяных реакторов, включая и реакторы типа КЛТ-40, широко используемых в настоящее время на ледоколах и плавучих энергоблоках (ПЭБ), остро стоит вопрос о продолжительности безопасной работы парогенераторов. Проблема связана с образованием микротрещин в водо-паропроводе парогенератора, при нормальной эксплуатации на мощности, через которые в паропровод проникает радиоактивный азот $^{16}\text{N}_7$, содержание которого в паре как раз и свидетельствует о признаке нарушения герметичности водо-паропровода второго контура парогенератора. Этот эффект, получивший в дальнейшем название «протечки», рассматривался ранее в ряде работ авторов в условиях циклической работы водопарового режима парогенератора. В настоящей работе основное внимание уделяется математическому и физическому анализу механизмов, обуславливающих образование микротрещин в паропроводе парогенератора, возникающих в области паропровода, в которой уравниваются давления воды и пара, а также проводится оценка их эффективной длины. Проведены расчеты температурного распределения по толщине паро-трубопровода в переходной области пар-вода при периодическом «захлестывании» этой области водой. При этом показано, что в зависимости от времени периода колебаний пар-вода радиальное температурное распределение по толщине трубки демонстрирует существенное различие в распределении при постоянной температуре на внешней поверхности трубки, причем максимальная разность температур наблюдается в области внутренней поверхности трубки. Распределение механических напряжений, возникающих в металле трубки, характеризуется линейной зависимостью напряжений от температуры, максимальное значение которых соответствует максимальной разности температур, характерных для области внутренней поверхности трубки. Это позволяет констатировать, что образование трещин начинается именно с области внутренней поверхности трубки парогенератора в указанной переходной его области.

Ключевые слова: микротрещины в парогенераторе, энергетический реактор, радионуклид, давление, температура, мощность дозы, радиационная безопасность.

Для цитирования Елохин А.П. Оценка эффективной длины микротрещин, возникающих в водо-паропроводе при циклическом режиме работы парогенератора АЭС. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(4):32-45. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-05>

For citation: Elokhin A.P. Estimation of the effective length of microcracks occurring in the water-steam pipeline at cyclic operation mode of NPP steam generator. *Global nuclear safety*. 2023;13(4):32-45 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-05>

Estimation of the effective length of microcracks occurring in the water-steam pipeline at cyclic operation mode of NPP steam generator

Alexander P. Elokhin  

National Research University «MEPhI», Moscow, Russia

 elokhin@yandex.ru

Abstract. During operation of water-water reactors including KLT-40 type reactors widely used nowadays on icebreakers and floating power units (FPU), the issue of the duration of safe operation of steam generators is acute. The problem is connected with the formation of microcracks in the steam generator water and steam piping during normal operation at power, through which radioactive nitrogen $^{16}\text{N}_7$ enters the steam piping, the content of which in the steam is just a sign of leakage failure of the steam generator second circuit water and steam piping. This effect, further named "leaks", was considered earlier in a number of works of the authors under conditions of cyclic operation of the steam generator water-steam mode. In the present work the main attention is paid to mathematical and physical analysis of the mechanisms causing the formation of microcracks in the steam pipeline of a steam generator arising in the steam pipeline region in which water and steam pressures are balanced, and their effective length is estimated. Calculations of temperature distribution along the steam-pipe thickness in the steam-water transition region at periodic "slamming" of this region with water are carried out. It is shown that depending on the time period of steam-water oscillations, the radial temperature distribution along the tube thickness shows a significant difference in the distribution at a constant temperature on the outer surface of the tube, and the maximum temperature difference is observed in the area of the inner surface of the tube. The distribution of mechanical stresses arising in the tube metal is characterized by a linear dependence of stresses on temperature, the maximum value of

which corresponds to the maximum temperature difference characteristic of the area of the inner surface of the tube. This allows us to state that the formation of cracks starts exactly from the area of the inner surface of the tube of the steam generator in the specified transitional area of the tube.

Keywords: steam generator microcracks, power reactor, radionuclide, pressure, temperature, dose rate, radiation safety.

Введение

При эксплуатации водо-водяных реакторов, включая и реакторы типа КЛТ-40, широко используемых в настоящее время на ледоколах и плавучих энергоблоках (ПЭБ), остро стоит вопрос о продолжительности безопасной работы парогенераторов. Проблема связана с образованием трещин в паропроводе парогенератора, при нормальной эксплуатации на мощности, через которые в паропровод проникает радиоактивный азот $^{16}\text{N}_7$ ($T_{1/2} = 7,11$ с, с энергией γ -излучения $E_{\gamma, \max} = 6,134$ МэВ и квантовым выходом $\nu_{\gamma, \max} = 69\%$), содержание которого в паре как раз и свидетельствует о признаке нарушения герметичности водопаропровода второго контура парогенератора [1, 2]. Этот эффект, получивший в дальнейшем название «протечки», рассматривался в работах [3–6]. Авторами была разработана математическая модель, позволяющая определить область формирования протечки в парогенераторе и провести расчеты, которые предоставили возможность получить оценку мощности «вброса» исследуемого радионуклида из теплоносителя первого контура в паропровод парогенератора. Эта область L_0 включает в себя границу раздела сред пар-вода, которая нагревается за счет передачи тепла от воды первого контура, обтекающей паропровод, создавая избыточное давление пара.

Общая часть

В настоящей работе основное внимание уделяется математическому и физическому анализу механизмов, обуславливающих образование в металле паропровода микротрещин длиной l (рис. 1), способствующих возникновению протечки в паропроводе парогенератора, а также осуществляется оценка их эффективной длины, которая периодически заполняется то паром, то водой, возникающей в выделенной области паропровода, поскольку у парогенератора задействована обратная связь, позволяющая автоматизировать процесс поддержания уровня воды в водопаропроводе на некотором заданном уровне L_0 , значение которого определено в работах авторов [3–6].

Теплообменник парогенератора выполнен из теплообменных труб с внешним диаметром 16 мм и толщиной $\delta = 1,4 - 1,5$ мм ($\delta = R_0 - R_1$) (см. рис. 1) изготовленных из стабилизированной титаном нержавеющей стали ОХ18Н10Т с плотностью $\rho_{\text{нр}}$, удельной теплоемкостью C , [Дж/(кг·град)] и коэффициентом теплопроводности λ , [Вт/м·град], значения которых как функция температуры (град) приведены в таблице 1.

С учетом того, что температура воды существенно ниже температуры пара в области ΔL_0 , теплообменник будет синхронно изменять температуру, что приведет к возникновению механических напряжений $\sigma_T(T)$ на указанном участке теплообменных труб и связанных с

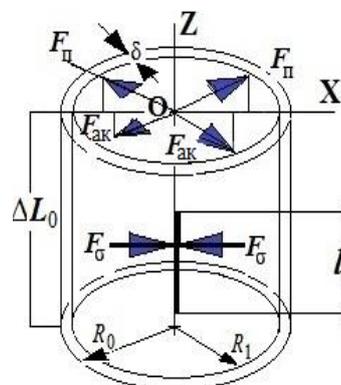


Рисунок 1. Действие сил на участок трубы парогенератора в области раздела сред вода/пар: F_n – механические силы, обусловленные давлением пара в трубе; $F_{\text{ак}}$ – силы акустического воздействия, возникающие в паре; $F_{\text{с}}$ – силы механических напряжений, обусловленных расширением и сжатием, возникающие в стенке трубы при изменении температурного режима в процессе эксплуатации парогенератора

Figure 1. Force action on the steam generator pipe section in the water/steam interface: F_n is mechanical forces due to steam pressure in the pipe; $F_{\text{ак}}$ is acoustic forces arising in the steam; $F_{\text{с}}$ is mechanical stress forces due to expansion and contraction, arising in the pipe wall at the change of the temperature regime during operation of the steam generator

Таблица 1 Характеристика стали 12Х18Н10Т¹
Table 1. Characteristics of 12Cr18Ni10T steel¹

T(град)	E 10 ⁵ (МПа)	λ (Вт/(м·град))	$\rho_{\text{нр}}$ (кг/м ³)	C (Дж/(кг·град))	10 ⁻⁶ D (м ² /с)
20	1,98	15	7920	-	-
100	1,94	16	-	462	4,369
200	1,89	18	-	496	4,583
300	1,81	19	-	517	4,646
400	1,74	21	-	538	4,924
500	1,66	23	-	550	-
600	1,57	25	-	563	-
700	1,47	27	-	575	-
800		26	-	596	-

ними сил $F_{\text{с}}(T)$ (см. рис. 1), способствующих возникновению трещин, через которые радиоактивный азот $^{16}\text{N}_7$, находящийся в воде первого контура, омывающей парогенератор, проникает в парогенератор, определяя так называемую протечку азота, выходящего с паром на турбину (рис. 2).

¹ Характеристика стали 12Х18Н10Т. – URL: <https://inoxtrade.ru/info/commoninfo/item100590/stal-12h18n10t/> (дата обращения: 16.09.2023)

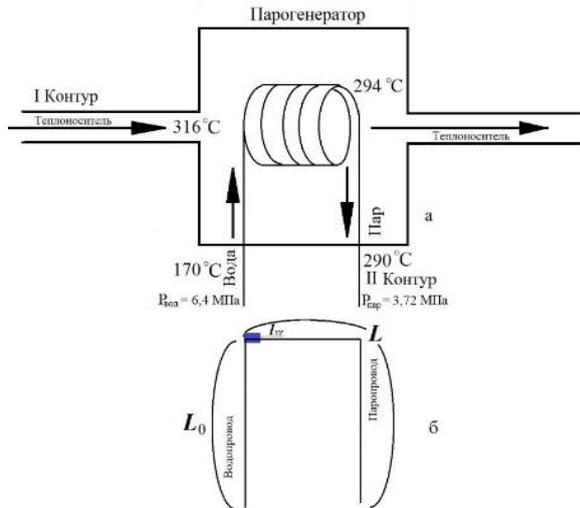


Рисунок 2. Иллюстрация к вопросу о протечке радионуклида ^{16}N из первого контура в паропровод второго – (а); к расчёту плотности пара $\rho n(x)$ и объёмной активности $QN(x, t)$ ^{16}N в паропроводе парогенератора – (б); l_{cr} – ширина области протечки (энергетические характеристики пара и воды приводятся из работ [1, 2])
 Figure 2. Illustration to the question of ^{16}N radionuclide leakage from the first circuit into the steam line of the second circuit – (a); calculation of steam density $\rho n(x)$ and volumetric activity $QN(x, t)$ of ^{16}N in the steam line of the steam generator – (b); l_{cr} is width of the leakage area (energy characteristics of steam and water are given from [1, 2])

Нетрудно понять, что подобная ситуация создает радиационно-опасную обстановку, противоречащую нормам радиационной безопасности (НРБ-99). Формированию трещин в области ΔL_0 также способствует внутреннее давление пара, создавая силы $F_{\text{п}} = P_{\text{п}} \cdot 2\pi R_1 l$, стремящиеся разорвать трубки парогенератора, а также, возможно, звуковые колебания, возникающие в паре, оказывая дополнительное внутреннее давление в виде сил $F_{\text{ак}} = -P_{\text{ак}} \cdot 2\pi R_1 l$, где $P_{\text{п}}$ и $P_{\text{ак}}$ давления пара и акустических колебаний соответственно в паропроводах парогенератора.

Поскольку процесс работы, состоящий в поддержании воды на уровне L_0 в водо-паропроводе парогенератора, как указывалось ранее, характеризуется некой периодичностью, для простоты его можно описать гармонической функцией вида: $L = L_0 + l \cdot \cos(\omega_0 t)$, где $\omega_0 = \pi/\tau$; $t = k\tau$; $k = 1, 2, 3, \dots, N$; $\tau = l/\bar{v}$; $\bar{v} = \sqrt{2P_{\text{вд}}/\bar{\rho}_{\text{в}}(T)}$; $P_{\text{вд}}$ – давление воды при ее подаче в водо-паропровод ($P_{\text{вд}} \approx 6,1 - 6,4$ МПа); $\bar{\rho}_{\text{в}}(T)$ – усредненное значение плотности воды (рис. 3) так, что при нечетных $k = 1, 3, \dots$, $L = L_0 - l$, а при четных $k = 2, 4, \dots$, $L = L_0 + l$.

Полагая, что трещина, в первую очередь, может возникнуть на стенке трубы парогенератора толщиной δ , непосредственно в рассматриваемой области, тогда сумма проекций на ось OX внешних радиальных сил F_x , действующих на разрыв в области щели, совместно с силами температурных напряжений, возникающих в этой области, должна удовлетворять второму закону Ньютона (1):

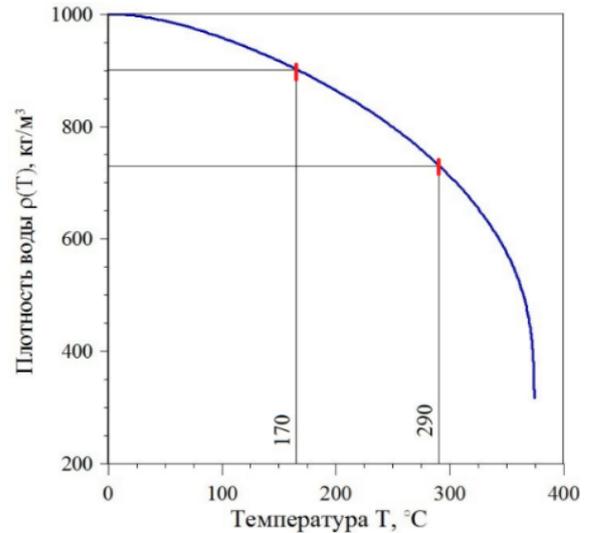


Рисунок 3. Зависимость плотности воды $\rho(T)$ от температуры (область кривой между метками аппроксимируется для удобства вычислений параболой)
 Figure 3. Dependence of water density $\rho(T)$ on temperature. The area of the curve between the marks is approximated by a parabola for the convenience of calculations

$$ma = F_x - F_{\sigma}, \quad (1)$$

где $m = \rho_{\text{ш}} \delta l \pi (R_0 + R_1)$ – эффективная масса участка трубы, в которой возникают микротрещины;
 $a = d^2 l / dt^2$ – ускорение, с которым происходит ее образование, т.е. изменяется ее размер;

$$F_x = \sum_0^{\pi/2} \int (F_{\text{п}} + F_{\text{ак}}) \cdot \cos \phi d\phi = 4(F_{\text{п}} + F_{\text{ак}}) - \text{проекция внешних радиальных сил на ось } OX;$$

$F_{\sigma}(T) = \delta l \cdot \sigma_T [T(r, \cos[\omega_0(t - \tau')])]$ – внутренние силы, возникающие в результате изменения температурного режима в водо-паропроводе парогенератора, и характеризующие изменения напряжений σ_T в металле трубы;

$T(r, \cos[\omega_0(t - \tau')])$ – распределение температуры по толщине паро-трубопровода, которое необходимо определить. Последнее обусловлено зависимостью коэффициента теплопроводности $\lambda(T)$, теплоемкости $C(T)$ и модуля упругости металла, из которого изготовлены теплообменные трубки парогенератора, от температуры.

Зависимость предельных напряжений, возникающих в металлических изделиях из стали соответствующих марок, при механических нагрузках, как функции температуры приведена на рисунке 4. Представленную линейную зависимость в диапазоне температур $T_1 \leq T \leq T_2$ °C, где $T_1 = 20$, $T_2 = 375$ °C, можно аппроксимировать выражением (2):

$$\sigma_T(T) = \sigma_T(T_1) + \frac{\sigma_T(T_1) - \sigma_T(T_2)}{(T_2 - T_1)} T_1 - \frac{\sigma_T(T_1) - \sigma_T(T_2)}{(T_2 - T_1)} T \quad (2)$$

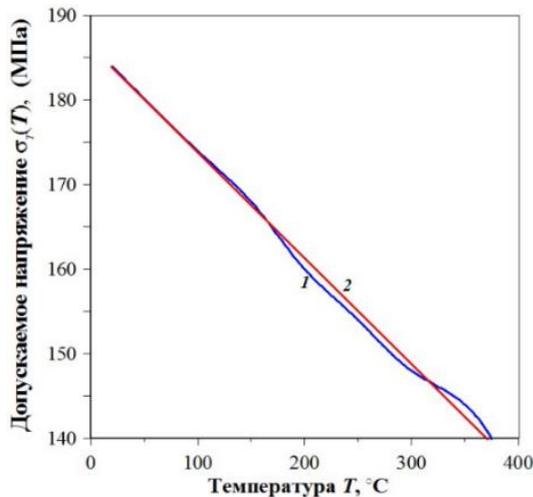


Рисунок 4. Зависимость допускаемого напряжения на изделии из стали марки 12X18H10T от температуры: 1 – зависимость, построенная по данным таблицы работы в ссылке [8], 2 – аппроксимация зависимости линейной функцией

Figure 4. Dependence of the allowable stress on the product from steel grade 12Cr18Ni10T on temperature: 1 – dependence plotted according to the data of the table of work [8], 2 – approximation of dependence by a linear function

Поскольку ранее мы определили, что температурный режим, выделенной области парогенератора, имеет гармонический характер, то силы, возникающие в результате изменения температурных напряжений на трубке парогенератора будут, очевидно, также носить подобный характер, которые, как и время запаздывания τ' ответной реакции материала трубки парогенератора на температурное возмущение, необходимо уточнить. Время запаздывания τ' можно оценить, используя среднее значение коэффициента диффузии \bar{D}_0 , толщину δ водо-паропровода и простое соотношение $\tau' = \delta^2 / \bar{D}_0$, где \bar{D}_0 – усредненный коэффициент диффузии по температуре для соответствующего металла, (см. табл. 1). При $\delta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м τ' составит 0,491 с, поэтому, рассматривая устоявшийся процесс (при больших t , исключая переходные процессы), величиной τ' можно пренебречь. В этом случае уравнение (1) можно переписать в виде выражения (3):

$$\rho_{\text{нр}} \delta l \pi (R_1 + R_2) \frac{d^2 l}{dt^2} = 8 \pi R_1 l (P_{\text{н}} + P_{\text{ак}}) - \delta l \cdot \sigma_T [T(r, \cos[\omega_0 t])] \quad (3)$$

в котором функция температурных напряжений $\sigma_T [T(r, \cos[\omega_0 t])]$, возникающих в металле трубки водо-паропровода, и будет определять гармонический характер температурных напряжений в выделенной области парогенератора. Чтобы определить вид этой функции необходимо найти решение уравнения теплопроводности участка цилиндрической трубы для $l \in \Delta L_0$ при условии $2R_1 \ll \Delta L_0$, т.е. решить уравнение вида (4):

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (4)$$

где $D(T) = \lambda(T) / [\rho \cdot C(T)]$, $[m^2/c]$ – коэффициент диффузии тепла в металле трубки парогенератора, с граничными условиями в выражениях (5), (6):

$$T(r, t)|_{r=R_0} = T_0, \quad (5)$$

$$T(r, t)|_{r=R_1} = T_{\text{ср}} - \Delta T \cos(\omega_0 t); \quad (6)$$

и начальным условием в выражении (7):

$$T(t, r)|_{t=0} = T_{\text{ср}} - \Delta T, \quad (7)$$

где T_0 – температура теплоносителя;

ΔT определяется половиной максимальной разности температур пара $T_{\text{п}}$ и воды $T_{\text{в}}$:

$$\Delta T = (T_{\text{п}} - T_{\text{в}}) / 2;$$

$$T_0 = 300, T_{\text{п}} = 290, T_{\text{ср}} = 230; T_{\text{в}} = 170^\circ\text{C}.$$

Усредняя коэффициент диффузии $D(T)$ по диапазону температур $100 \leq T \leq 300^\circ\text{C}$ по формуле $\bar{D}_0 = \sum D^2(T_i) T_i / D(T_i) T_i$, $T_i = 100, 200, 300$, находим, что крайние значения $D(T)$ из указанного диапазона отличаются не более, чем на 6%, а среднее значение составляет $\bar{D}_0 = 4,581 \cdot 10^{-6} m^2/c$. Полученные данные позволяют констатировать, что температурная зависимость коэффициента диффузии слабо выражена, что и позволяет считать $D(T)$ постоянной величиной равной ее среднему значению. Последнее позволяет переписать уравнение (1) в виде уравнения (8):

$$\frac{dT}{dt} = \Delta T, \quad (8)$$

где оператор $\Delta = \frac{\bar{D}_0}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right)$, с граничными и

начальными условиями в выражениях (5)–(7), что позволит существенно упростить решение полученного уравнения. Решение уравнения (8) будем искать в виде уравнения (9):

$$T(r, t) = W(r) + T'(r, t), \quad (9)$$

² ГОСТ 14249-89 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Приложение 1. Допускаемые напряжения для разных видов сталей. – Режим доступа: <https://zavod-rezervuar.ru/proektirovshhiku/spravochnaya-informacziya-gost-sniipy-pb/gost-14249-89-sosudy-i-apparaty-normy-i-metody-rascheta-na-prochnost/prilozhenie-1/> (дата обращения: 16.09.2023).

где для функции $W(r)$ (с безразмерной переменной r/R_0) ставится задача, выражения (10), (11), (12):

$$\Delta W = 0, \quad (10)$$

$$W(r)|_{r=R_0} = T_0, \quad (11)$$

$$W(r)|_{r=R_1} = T_{cp} - \Delta T \cos(\omega_0 t). \quad (12)$$

Для функции $T'(r, t)$ задача ставится следующим образом в формуле (13):

$$\Delta T' = \frac{\partial T'}{\partial t}, \quad (13)$$

с граничными и начальными условиями, выражения (14), (15), (16):

$$T'(r, t)|_{r=R_0} = 0, \quad (14)$$

$$T'(r, t)|_{r=R_1} = 0, \quad (15)$$

$$T'(r, t)|_{t=0} = (T_{cp} - \Delta T) - W(r)|_{t=0}. \quad (16)$$

Решение уравнения (10) имеет вид выражения (17):

$$W = C_1 \ln r + C_2, \quad (17)$$

а решение задачи (10) – (12) после подстановки граничных значений (11), (12) определится выражением (18):

$$W(r) = \frac{T_0 \ln(r/R_1) - [T_{cp} - \Delta T \cos(\omega_0 t)] \ln(r/R_0)}{\ln(R_0/R_1)}, \quad (18)$$

$$W(r)|_{t=0} = \frac{T_0 \ln(r/R_1) - [T_{cp} - \Delta T] \ln(r/R_0)}{\ln(R_0/R_1)}$$

Для решения задачи (13)–(16) используем метод разделения переменных [7, 8], представляя функцию $T'(r, t)$ в виде произведения двух функций $U(r)$ и $V(t)$, и подставляя в уравнение (13), получим выражение (19):

$$U \frac{dV}{dt} = V \frac{\bar{D}_0}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right). \quad (19)$$

Для дальнейшего решения приведем полученное уравнение (19) к безразмерным переменным. Для чего обе части последнего уравнения умножим на ранее введенный параметр $\tau = \Delta L_0 / \bar{v}$, представляющий собой характерное время, необходимое для вытеснения пара водой на расстояние (длину ΔL_0), движущейся в водопроводе со скоростью \bar{v} , правую часть, дополнительно, умножим и разделим на R_0^2 а выражение в

круглых скобках правой части этого уравнения умножим и разделим на R_0 . Тогда в левой части мы будем иметь безразмерное время $t' = t/\tau$, а в правой вместо размерного r , будем иметь дело с безразмерным $r' = r/R_0$ и в место коэффициента \bar{D}_0 будем использовать безразмерный коэффициент равный $\bar{D} = \bar{D}_0 \cdot \tau / R_0^2$. Кроме того, удобства ради, будем считать, что переменные, (опуская в r' штрих) в нашем уравнении безразмерные, а безразмерный коэффициент диффузии равен \bar{D} . Тогда, разделяя переменные U и V , получим:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\bar{D}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) = -\mu \cdot$$

Приравнивая отношение каждой из дробей к постоянной величине $-\mu$, получаем два уравнения, для которых будем искать нетривиальные решения, т.е. не тождественный нуль, выражения (20), (21):

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\mu r}{\bar{D}} U = 0, \quad (20)$$

$$\frac{dV}{dt} + \mu V = 0. \quad (21)$$

Проводя дифференцирование в уравнении (20), получим выражение (22):

$$r \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\mu}{\bar{D}} r U = 0. \quad (22)$$

Решение уравнения (22) имеет вид выражения (23):

$$U(r) = C_1 J_0(r\sqrt{b}) + C_2 Y_0(r\sqrt{b}), \quad (23)$$

где $b = \mu/\bar{D}$; J_0 , Y_0 – линейно независимые функции Бесселя (Ф.Б.) нулевого порядка [9], а C_1 и C_2 – постоянные.

Важные свойства Функций Бесселя нулевого порядка определяются тем, что $J_0(x)$ является ограниченной функцией и $J_0(0) = 1.0$, а функция $Y_0(x)$ – неограниченной ($Y_0(0) = -\infty$) [10]. Кроме того, каждая из функций $J_0(x)$, $Y_0(x)$ имеет бесконечное множество действительных нулей, значения которых определяют собственные значения (с.з.) функции. Функции $J_0(x)$, $Y_0(x)$ ортогональны с весом x , т.е. $\int_0^l x J_0\left(\frac{\alpha}{l} x\right) J_0\left(\frac{\beta}{l} x\right) dx = 0$ при $\alpha \neq \beta$ и оба числа являются корнями уравнения $J_0(\gamma) = 0$, т.е. собственными значениями [8]. Приближенные значения нулей функции Бесселя $J_0(\gamma_m) = 0$ могут быть вычислены по формуле (24) [9]:

$$\gamma_m = 2.4 + 3.13(m - 1), \quad (24)$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$, максимальная погрешность, которая составляет 0,2 %.

Учитывая область исследования (тонкую металлическую трубку, с относительной толщиной $\delta = [R_0 - R_1]/R_0$) и особенности функций $J_0(x)$, $Y_0(x)$, уравнение (23) можно переписать для безразмерной переменной δ . В этом случае эта безразмерная переменная δ будет изменяться (с учетом представления безразмерного радиуса $r' = r/R_0$) от $\delta_1 = 0: (R_0 - R_0)/R_0$ до $\delta_2 \neq 0: (R_0 - R_1)/R_0$. В таком случае мы имеем два уравнения (25) и (26), удовлетворяющих граничным условиям:

$$0 = C_1 J_0(0\sqrt{b}) + C_2 Y_0(0\sqrt{b}), \quad (25)$$

$$0 = C_1 J_0(\delta\sqrt{b}) + C_2 Y_0(\delta\sqrt{b}). \quad (26)$$

Используя свойства функций $J_0(x)$, $Y_0(x)$, и, требуя ограниченности и не тривиальности решения, полагаем в уравнении (25) $C_2 = 0$, откуда следует, что C_1 не должен быть равен нулю ($C_1 \neq 0$). Тогда из уравнения (26) и вытекающего из него условия $J_0(\delta\sqrt{b}) = 0$, находим собственные значения μ_m , выражение (27):

$$\mu_m = \left(\bar{D}/\delta^2\right) \gamma_m^2, \quad (27)$$

где величина γ_m определена формулой (24).

Собственным значениям (27) отвечают собственные функции, выражение (28):

$$U_m(r) = J_0\left(\frac{(R_0 - r)}{R_0} \sqrt{\frac{\mu_m}{D}}\right), \quad (28)$$

где размерное значение r удовлетворяет неравенству $R_1 \leq r \leq R_0$.

Решение уравнения (21) представляет собой выражение (29):

$$V(t) = B_m \exp(-\mu_m t), \quad (29)$$

где B_m – постоянная, а μ_m определено формулой (27).

Записывая функцию $T'(r, t)$ в виде произведения двух функций $U(r)$ и $V(t)$, решение задачи (13) – (14) может быть представлено в виде выражения (30):

$$T'(r, t) = \sum_{m=1}^{\infty} B_m J_0\left(\frac{(R_0 - r)}{R_0} \sqrt{\frac{\mu_m}{D}}\right) \exp(-\mu_m t), \quad (30)$$

где μ_m определено выражением (27) при $m = 1, 2, 3, \dots$. Для вычисления постоянных B_m воспользуемся начальным условием (28) и свойством ортогональности с. ф. Для чего представим выражение $[(T_{cp} - \Delta T) - W(r)]_{t=0}$ в граничном условии (16) в виде разложение по с. ф. (28) краевой задачи при $t = 0$, т.е. представим в виде (31):

$$\begin{aligned} & \left[(T_{cp} - \Delta T) - W(r) \right]_{t=0} = \\ & = \sum_{m=1}^{\infty} B_m J_0\left(\frac{(R_0 - r)}{R_0} \sqrt{\frac{\mu_m}{D}}\right) = \sum_{m=1}^{\infty} B_m J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_m\right), \end{aligned} \quad (31)$$

где $x = (R_0 - r)/R_0$ и $\delta = (R_0 - R_1)/R_0$, а γ_m определяется формулой (24). Далее умножим обе части уравнения (31) на произведение $x \cdot J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_n\right)$ и проинтегрируем по интервалу $[0, \delta]$, тогда левая часть будет представлять выражение:

$$\begin{aligned} & \left[(T_{cp} - \Delta T) - W(x) \right]_{t=0} = \quad , \quad \text{а вместо} \\ & = [T_{cp} - T_0 - \Delta T] \cdot [1 + \ln(1-x)/\ln(R_0/R_1)] \end{aligned}$$

выражения (31) получим выражение (32):

$$\begin{aligned} & \left[(T_{cp} - \Delta T) - T_0 \right] \left\{ \int_0^{\delta} x J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_n\right) dx + \frac{\int_0^{\delta} x \ln(1-x) J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_n\right) dx}{\ln\left(\frac{R_0}{R_1}\right)} \right\} = \\ & = \int_0^{\delta} x J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_n\right) \left[\sum_{n=1}^{\infty} B_m J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_m\right) \right] dx \end{aligned} \quad (32)$$

С учетом свойства ортогональности с.ф. $\left(\int_0^{\delta} x J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_m\right) J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_n\right) dx = 0, \text{ при } \gamma_m \neq \gamma_n\right)$ и при $\gamma_m = \gamma_n$ в правой части получаем квадрат нормы, выражение (33):

$$\left\| J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_m\right) \right\|^2 = \int_0^{\delta} x J_0^2\left(\frac{x}{\delta} \gamma_m\right) dx = \frac{\delta^2}{2} \left[[J_0'(\gamma_m)]^2 + [J_0^2(\gamma_m)] \right], \quad (33)$$

где $J_0'(x) = -J_1(x)$, $m = 1, 2, 3, \dots$, а в левой – выражение (34) [11]:

$$\int_0^{\delta} x J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_m\right) dx = \left(\frac{\delta}{\gamma_m}\right)^2 \cdot \gamma_m J_1(\gamma_m). \quad (34)$$

Интеграл от второго слагаемого в левой части выражения (32) (в фигурных скобках) вычислялся численно, что позволяет определить коэффициенты B_m в виде выражения (35):

$$B_m = \frac{[(T_{cp} - \Delta T) - T_0] \left\{ \int_0^{\delta} \left[x + \frac{x \cdot \ln(1-x)}{\ln(R_0/R_1)} \right] J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_m\right) dx \right\}}{\left\| J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_m\right) \right\|^2}, \quad (35)$$

Таким образом, решение задачи (13)–(16) представляет собой бесконечную сумму вида (30) с коэффициентами B_m , определяемыми формулой (35), а решение задачи (4)–(7) представляет собой сумму решений вида (18) и (30) с коэффициентами B_m , определяемыми формулой (35) при μ_m , вычисляемых по формуле (27), а γ_m – (24).

$$T(r, t) = \frac{T_0 \ln\left(\frac{r}{R_1}\right) - [T_{cp} - \Delta T \cos(\omega_0 t)] \ln\left(\frac{r}{R_0}\right)}{\ln\left(\frac{R_0}{R_1}\right)} + \sum_{m=1}^{\infty} B_m J_0\left(\frac{(R_0 - r)}{R_0} \sqrt{\frac{\mu_m}{D}}\right) \exp(-\mu_m t) \quad (36)$$

где коэффициенты B_m определяются выражением (35), при $\delta = (R_0 - R_1)/R_0$, с квадратом нормы Ф.Б. нулевого порядка $J_0(x)$ вида:

$$\begin{aligned} \left\| J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_m\right) \right\|^2 &= \frac{\delta^2}{2} \{ [J_0'(\gamma_m)]^2 + J_0^2(\gamma_m) \} = \\ &= \frac{\delta^2}{2} \{ [J_1(\gamma_m)]^2 + [J_0^2(\gamma_m)] \} \end{aligned}$$

При больших x ($x \gg 20$) для $J_0(x)$ и $J_1(x)$ целесообразно использовать асимптотические разложения для этих функций:

$$J_0(x) = (\cos(x) + \sin(x)) / \sqrt{\pi x};$$

$$J_1(x) = (\sin(x) - \cos(x)) / \sqrt{\pi x}, [9].$$

Решение задачи (4)–(7), определяемое формулой (36), представляет собой температурное распределение, возникающее по толщине трубки водопаропровода в различные моменты времени, и, как следует из решения, также является гармонической функцией. Следует отметить, что в формуле (36) первое слагаемое играет доминирующую роль. Соответствующие картины температурных распределений по толщине трубки в моменты времени $t = 0$, $t = \tau/2$ и $t = \tau$, в которые $\cos(\omega_0 t)$ в первом слагаемом формулы (36) будет соответственно равен 1, нулю и минус 1, приведены на рисунке 5, на котором точка сходимости кривых соответствует температуре внешней поверхности парогенератора. Кроме того, решение (36) с учетом выражения (2), описывающего зависимость напряжений в трубке парогенератора от температуры, позволяет получить окончательное выражение для сил упругих напряжений, возникающих в паропроводе парогенератора. Подставляя в формулу (2) выражение (36), определяющее температурное поле по толщине δ паро-трубопровода, мы, таким образом, находим температурные напряжения, возникающие в металле водопаропровода при заполнении трубки паром или водой, и обусловленные этими напряжениями механические силы $F_\sigma(r, T)$, на которые указывали ранее в формулах (1), (3):

$$F_\sigma(r, T) = \delta l \cdot \left[\begin{aligned} &\sigma_T(T_1) + \frac{\sigma_T(T_1) - \sigma_T(T_2)}{(T_2 - T_1)} T_1 - \\ &-\frac{\sigma_T(T_1) - \sigma_T(T_2)}{(T_2 - T_1)} T(r, t) \end{aligned} \right],$$

где $T(r, t)$ определено формулой (36).

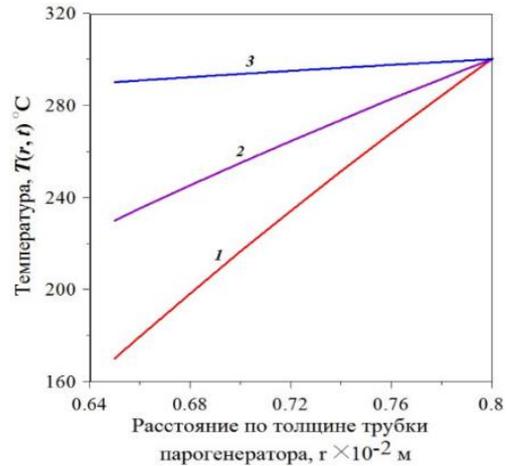


Рисунок 5. Распределение температуры по толщине металла трубки парогенератора в различные моменты времени периода колебаний τ : в момент времени $t = 0$, (1); $t = \tau/2$, (2); $t = \tau$, (3)

Figure 5. Temperature distribution along the thickness of the steam generator tube metal at different moments of the oscillation period τ : at time $t = 0$, (1); $t = \tau/2$, (2); $t = \tau$, (3)

Графики распределения сил упругих напряжений, возникающих по толщине металла трубки парогенератора, приведены на рисунке 6. Точка сходимости кривых соответствует температуре на внешней поверхности парогенератора $T(r, t) = 300$ °С.

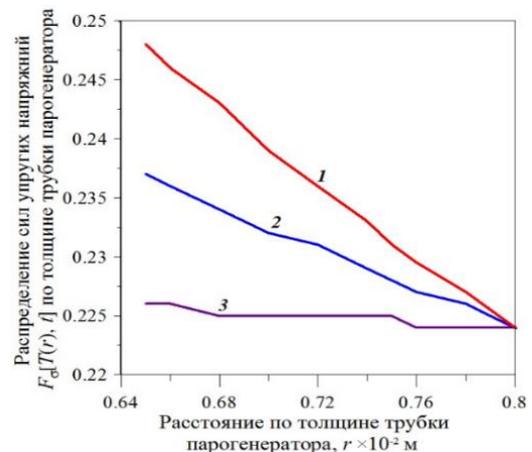


Рисунок 6. Распределение сил упругих напряжений, возникающих по толщине трубки парогенератора в различные моменты времени периода колебаний τ : в момент времени $t = 0$, (1); $t = \tau/2$, (2); $t = \tau$, (3); точка сходимости кривых соответствует температуре на внешней поверхности

Figure 6. Distribution of elastic stress forces occurring along the thickness of the steam generator tube at different moments of the oscillation period τ : at time $t = 0$, (1); $t = \tau/2$, (2); $t = \tau$, (3); the convergence point of the curves corresponds to the temperature at the outer surface

Далее рассмотрим силы, обусловленные действием пара, образующимся в паропроводе в результате испарения воды, поступающей в водопаропровод при передаче тепла от теплоносителя первого контура. Рассматривая давление пара в области его образования и распространения по паропроводу парогенератора, следует также учитывать и акустические эффекты

в паре в виде возможного дополнительного акустического давления в указанных областях [12]. Акустическое воздействие на паропровод может быть связано с возникновением пульсирующих сил, вызываемых потоком пара в водо-паропроводе парогенератора, имеющим периодический характер. Эксплуатационные вибрации паропроводов на АЭС с ВВЭР-1000 наблюдались с самого начала эксплуатации данных блоков. Измерениями было доказано, что источником эксплуатационных вибраций являются пульсации давления в паропроводах, которые имеются в каждом парогенераторе. Это позволяет сформулировать задачу определения пульсации давления и описать их уравнением второго порядка, которое имеет волновую природу [13, 14]. Однако, как и при решении задачи определения температурного поля (4)–(7), решение настоящей задачи (37) будем искать лишь для $l \in \Delta L_0$ при выполнении условия $2R_1 \ll \Delta L_0$, предполагая изотропию среды по азимуту за счет осевой симметрии объекта, что позволит существенно упростить решение:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P_{\text{ак}}}{\partial r} \right) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P_{\text{ак}}}{\partial t^2} = 0, \quad (37)$$

где c – скорость звука в среде (насыщенном паре)³.

Для задания граничного условия при $r = R_1$ воспользуемся граничным условием (6) и уравнением Клапейрона-Менделеева для давления пара с учетом его зависимости от температуры: $P_{\text{п}} = \rho(T_{\text{п}}) R T_{\text{п}}$, где $\rho(T)$ – плотность пара как функция температуры (рис. 7)⁴; R – постоянная Больцмана ($\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$);

$T_{\text{п}}(r, t)|_{r=R_1} = T_{\text{ср}} - \Delta T \cos(\omega_0 t)$ [°K] из условия (6), выражение (38):

$$P_{\text{ак}}(r, t)|_{r=R_1} = \rho(T_{\text{п}}(r, t)|_{r=R_1}) \cdot R \cdot T_{\text{п}}(r, t)|_{r=R_1}. \quad (38)$$

Граничное условие при $r = 0$ определяем, исходя из осевой симметрии задачи, выражение (39):

$$\left. \frac{\partial P_{\text{ак}}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad (39)$$

которое означает, что в центре трубы с паром давление пара будет либо постоянным, либо всегда иметь

место экстремум. Начальное условие (40) задаем также, используя уравнение Клапейрона-Менделеева при $T_{\text{п}}(r, t)|_{t=0} = T_{\text{ср}} - \Delta T$, выражение (40):

$$P_{\text{ак}}(r, t)|_{t=0} = \rho[T_{\text{п}}(r, t)|_{t=0}] \cdot R \cdot T_{\text{п}}(r, t)|_{t=0}. \quad (40)$$

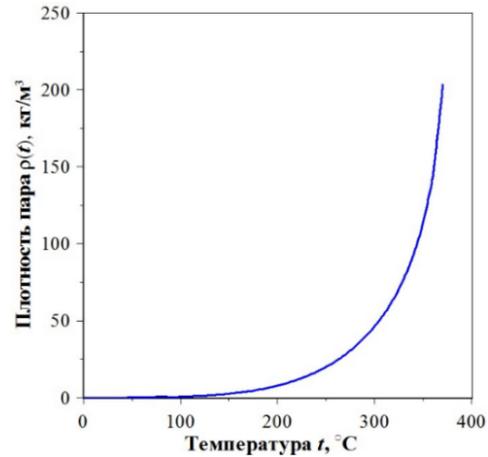


Рисунок 7. Зависимость плотности насыщенного пара как функции температуры

Figure 7. Dependence of saturated vapor density as a function of temperature⁵

Для дальнейшего решения задачи приведем уравнение (37) к безразмерному виду, для чего первое слагаемое в (40) умножим и разделим на R_1^3 , а второе – умножим и разделим на τ^2 и, вводя безразмерные переменные $r' = r/R_1$, $t' = t/\tau$, получим уравнение: $\frac{1}{r'} \frac{\partial}{\partial r'} \left(r' \frac{\partial P_{\text{ак}}}{\partial r'} \right) - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P_{\text{ак}}}{\partial t'^2} = 0$, в котором $c_0 = c \cdot (\tau/R_1)$. Далее, опуская штрих, получаем уравнение (41) в безразмерных переменных:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P_{\text{ак}}}{\partial r} \right) - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P_{\text{ак}}}{\partial t^2} = 0, \quad (41)$$

с граничным условием (42):

$$P(r, t)|_{r=1} = \rho(T_{\text{п}}(r, t)|_{r=1}) \cdot R \cdot T_{\text{п}}(r, t)|_{r=1}. \quad (42)$$

Кроме того, дополнительно потребуем условия обращения в нуль производной от давления $P(r, t)$ по времени при $t = 0$, предполагая отсутствие резких переходных процессов, выражение (43):

$$\left. \frac{\partial P_{\text{ак}}(r, t)}{\partial t} \right|_{t=0} = 0. \quad (43)$$

При решении задачи (37) – (40), (42), (43) искомую функцию $P_{\text{ак}}(r, t)$ представляем в виде суммы двух функций $U(r, t)$ и $W(r)$: $P_{\text{ак}}(r, t) = U(r, t) + W(r)$. Для $W(r)$ ставится задача (44), (45), (46):

⁵ Волков А.И., Жарский И.М. Большой химический справочник. – Мн.: Современная школа, 2005. – 608 с.

³ В жидкостях и твердых телах в обычных условиях скорость звука падает при увеличении температуры. Вода – исключение: в ней скорость звука растет с повышением температуры до, примерно, 74°C и только при больших температурах начинает падать [10].

⁴ Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. – URL: <https://base.garant.ru/4188851/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/> (дата обращения: 16.09.2023).

$$\Delta W = 0; \quad (44)$$

$$\left. \frac{\partial W}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad (45)$$

$$W(r)|_{r=1} = \rho(T_n(r,t)|_{r=1}) \cdot R \cdot T_n(r,t)|_{r=1}, \quad (46)$$

где $T_n(r, t)|_{r=1} = T_{cp} - \Delta T \cos(\omega_0 t)$.

Для функции $U(r, t)$ формулируется задача (47), (48), (49):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0; \quad (47)$$

$$\left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad (48)$$

$$U(r, t)|_{r=1} = 0, \quad (49)$$

с начальными условиями (50), (51):

$$\left. \frac{\partial U(r, t)}{\partial t} \right|_{t=0} = 0. \quad (50)$$

$$U(r, t)|_{t=0} = \rho(T_n(r, t)|_{t=0}) \cdot R \cdot T_n(r, t)|_{t=0} - W(r)|_{t=0}, \quad (51)$$

где $T_n(r, t)|_{t=0} = (T_{cp} - \Delta T)$.

Условие (50) физически может означать, что давление пара в рассматриваемый момент времени ($t = 0$) является либо постоянным, либо имеет экстремальное значение.

Решение уравнения (44) имеет вид (17), а требования ограниченности решения и удовлетворения граничным условиям (45), (46), приводит к выражению (52):

$$W(r) = \rho(T_n(r, t)|_{r=1}) \cdot R \cdot T_n(r, t)|_{r=1}, \quad (52)$$

т.е. $W(r)$ не зависит от r , но изменяется со временем как $T_n(r, t)|_{r=1}$. Таким образом при выполнении условий (48) – (51) следует, что $U(r, t) \equiv 0$, а $P_{ак}(r, t) = W(r) = \rho(T_n(r, t)|_{r=1}) \cdot R \cdot T_n(r, t)|_{r=1}$, т.е. давление $P_{ак}(r, t)$ определяется только давлением пара, определяемым уравнением Клапейрона-Менделеева.

Обсуждение результатов

Таким образом, в рамках рассматриваемой математической модели работы парогенератора решение задач (4)–(7), (8)–(36), показывает, что температурное распределение, возникающее по толщине металлической оболочки паропровода парогенератора, при заданном периодическом режиме его работы, существенно различается даже в течение одного периода

колебаний τ сред пар-вода (см. рис. 5). Изменение температурного режима переходной области пар-вода обуславливает возникновение по толщине металлической оболочки паропровода парогенератора значительных упругих напряжений (см. рис. 6), обусловленных температурными изменениями, также связанными с периодическим характером его работы. Причем, как это следует из рисунка 6, основные температурные напряжения в металле паропровода возникают на его внутренней стенке, поскольку в этой области наблюдается значительная разность температур (см. рис. 5), т.е. возникновение трещин, через которые в паропровод могут проникать радионуклиды из теплоносителя, начинается с внутренней стороны паропровода. В результате продолжительной эксплуатации паропровода, очевидно, наступает усталость металла, что и приводит к образованию трещин, а общее внутреннее давление пара лишь усиливает возникающий эффект. Из рисунка 6, в частности, следует, что в части паропровода, расположенной ниже и выше от исследуемой области ($x \sim L_0$), температурные напряжения в паропровode будут слабо выражены, поскольку отличие температуры внешней и внутренней поверхностей паропровода будет либо незначительным при $x \gg L_0$ либо будет постоянно, т.е. не будет изменяться во времени при $x \ll L_0$. Напротив, решение задач (37)–(40), (41)–(51), показывает, что давление пара, возникающего в паропровode при испарении воды, описывается уравнением Клапейрона-Менделеева и только этот характер давления может оказывать дополнительный эффект в образовании трещин в паропровode и возникновении протечки парогенератора.

Оценка длины микротрещин, возникающих в паропровode парогенератора

Возвращаясь к вопросу оценки длины микротрещины, которая была определена уравнением (3), подведем некоторые итоги нашего исследования, и внесем определенные коррективы, которые позволят нам получить окончательную оценку рассматриваемого параметра – длины микротрещины в паропровode парогенератора. Таким образом, было получено, что основным механизмом образования трещин в паропровode парогенератора являются механические напряжения металла паропровода, вызываемые резкими температурными колебаниями в области паропровода, в которой устанавливается равновесное давление пара и воды [3–6]. Температурное распределение по толщине трубки парогенератора в различные моменты времени периода колебаний, т.е. в моменты времени периодического заполнения водой области ΔL_0 , в которой устанавливается равновесное давления пара, описывается формулой (36) и приводится на рисунке 5. Температурное распределение напряжений и сил, возникающих в металле трубки парогенератора, в рамках рассматриваемой модели возникновения эффекта, описывается формулой (1).

Для оценки влияния акустического давления, возникающего в паре паропровода, рассматривалась задача, определения пульсаций давления, которая описывается уравнением второго порядка, имеющего волновую природу (37)–(40). В рамках рассматриваемой

мой модели (41)–(51) было показано, что в паропроводе в исследуемой области пульсаций давления, имеющих высокочастотный характер, не возникает. На формирование трещин в паропроводе, как показало решение задачи, существенное влияние оказывает периодическое изменение температуры в области равенства давлений пара и воды (ΔL_0) и общее давление пара, которое описывается известной зависимостью Клапейрона-Менделеева $P_{\text{п}}(r, t) = \rho(\bar{T}_{\text{п}})RT_{\text{п}}(r, t)|_{r=1}$, и в силу циклического характера работы парогенератора в рассматриваемой области ΔL_0 кроме температуры также зависит и от времени.

Таким образом, результаты анализа позволяют переписать уравнение (3), учитывая лишь зависимость температуры пара внутреннего давления в паропроводе от времени в виде гармонической функции $[\cos(\omega_0 t)]$ и пространственно-временную зависимость сил, связанных с температурными напряжениями, возникающими по толщине паро-водопровода парогенератора в рассматриваемой области, уравнение (53):

$$\rho_{\text{п}} \delta l \pi (R_1 + R_2) \frac{d^2 l}{dt^2} = 8\pi R_1 P_{\text{п}}(r, t)|_{r=1} - \delta l \cdot P_{\sigma}(r, t). \quad (53)$$

Представляя $F_{\sigma}(r, t)$ в виде:

$$F_{\sigma}(r, T) = \delta l \cdot [a - b \cdot T(r, t)],$$

$$b = (\sigma_T(T_1) - \sigma_T(T_2)) / (T_2 - T_1),$$

$$a = \sigma_T(T_1) + \frac{\sigma_T(T_1) - \sigma_T(T_2)}{(T_2 - T_1)} T_1; \text{ и, ограничиваясь в}$$

формуле (36) первым слагаемым

$$T(r, t) \approx (T_0 \ln(r/R_1) - [T_{\text{сп}} - \Delta T \cos(\omega_0 t)] \ln(r/R_0)) / \ln(R_0/R_1)$$

и $T(r, t) = c + d \cdot \cos(\omega_0 t)$,

$$\text{где } c = (T_0 \cdot \ln(r/R_1) - T_{\text{сп}} \cdot \ln(r/R_1)) / \ln(R_0/R_1);$$

$d = \Delta T \cdot \ln(r/R_0) / \ln(R_0/R_1)$, уравнение (53), представим выражением (54):

$$\frac{d^2 l(r, t)}{dt^2} = (A - B + C) + D \cdot \cos(\omega_0 t), \quad (54)$$

$$\text{где } A = \frac{8R_1 \cdot \rho_{\text{п}}(\bar{T})R}{\rho_{\text{п}}(R_1 + R_0) \cdot \delta} \bar{T}_K;$$

$$B = \frac{a}{\rho_{\text{п}} \pi (R_1 + R_0)};$$

$$C = \frac{b \cdot c}{\rho_{\text{п}} \pi (R_1 + R_0)};$$

$$D = \left[\frac{b \cdot d}{\rho_{\text{п}} \pi (R_1 + R_0)} - \frac{8R_1 \cdot \rho_{\text{п}}(\bar{T})R}{\rho_{\text{п}}(R_1 + R_0) \delta} \Delta T_K \right],$$

с нулевыми начальными условиями (55), (56):

$$l(r, t)|_{t=0} = 0, \quad (55)$$

$$\left. \frac{dl(r, t)}{dt} \right|_{t=0} = 0. \quad (56)$$

Условие (55) означает, что в начальный момент времени микротрещины отсутствуют, а условие (56) свидетельствует о том, что длина микротрещины является величиной постоянной. Решение уравнения описывается простым выражением: $l(r, t) = [(A - B + C)/2]t^2 - (D/\omega_0^2) \cdot \cos(\omega_0 t) + Ft + G$, коэффициенты которого F и G находят, используя начальные условия (55), (56): $G = D/\omega_0^2$; $F = 0$. Если рассматривать ненулевое начальное условие (55), то длина щели будет увеличиваться. Таким образом, решение уравнения (54) при нулевых начальных условиях будет имеет вид (57):

$$l(r, t) = \frac{(A - B + C)}{2} t^2 + \frac{D}{\omega_0^2} \cdot (1 - \cos(\omega_0 t)). \quad (57)$$

Расчет длины микротрещины проводился для промежутка времени равном длительности периода колебаний вода-пар, возникающего при заполнении в паропроводе области ΔL_0 парогенератора той или иной средой, $\tau = 2,26 \cdot 10^{-4}$ с и $P_{\text{гр}} = 6,4$ МПа. Результаты расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2. Длина микротрещины в паропроводе парогенератора за период $\tau/2$ и парогенератора
Table 2. Microcrack length in the steam line of the steam generator for the period $\tau/2$ and $\tau = 2,3 \cdot 10^{-4}$ s

L_s , м	ΔL_0 , м	$l_{vr}(\tau/2)$, м	$l_{vr}(\tau)$, м
10	0,0205	0,004	0,031
20	0,024	0,006	0,042
35	0,027	0,008	0,056

Расчеты показывают, что длина⁶ микротрещины l_{vr} за период колебаний τ зависит от разности хода воды ΔL_0 (области захлестывания) в паропроводе парогенератора от 3,1 см до 5,3 см., т.е. оказывается больше в 1,5–2 раза рассматриваемой области ΔL_0 . Кроме того длина микротрещины существенно зависит от температуры и плотности пара $\rho_{\text{п}}(L_0)$ в указанной области. Но зависимость длины микротрещины от времени t , если не учитывать возможный ее рост со временем, целесообразно рассматривать лишь за время периода колебаний τ , тогда целое число, определяемое отношением времени эксплуатации парогенератора t к периоду колебаний $K = [t/\tau]$, даст оценку общего числа микротрещин, значение которого K_{max} и определит время работоспособности парогенератора. Кроме то-

⁶ Трещины, наблюдающиеся чаще всего на наружной и внутренней поверхностях трубной заготовки или стальной трубы, располагаются в продольном направлении. Последнее связано с тем, что разрывающая сила в этом направлении больше, чем в поперечном, почти в два раза. – Режим доступа: <https://markmet.ru/defekty-stalei/prodolnye-freshchiniy-razryvy> (дата обращения: 16.09.2023).

го, как указывалось ранее, температурные напряжения по толщине паропровода для областей, расположенных дальше от исследуемой области ($x \gg L_0$) (кривую 3 на рис. 6), будут слабо выражены, поскольку температура на внешней и внутренней поверхностях паропровода будут мало отличаться (см. кривую 3 на рис. 5). Время t_{max} или число K_{max} может быть определено только экспериментально, основываясь на достижении в турбинном зале радиоактивного загрязнения при возникновении протечек в парогенераторе, при котором мощность дозы, создаваемая ИИ радионуклидов, вышедших с паром, будет соответствовать или превышать предельно допустимое значение мощности дозы для персонала, согласно нормам радиационной безопасности НРБ-99/2009 (см. постраничную ссылку 4).

Влияние воздействия ионизирующего излучения

Несомненно, что омываемый теплоносителем первого контура парогенератор подвергается воздействию ионизирующего излучения, к видам которого, следует отнести γ -излучение продуктов активации, присутствующих в теплоносителе первого контура, β -излучение, возникающее, в основном, в результате комптоновского эффекта и фотоэффекта в среде теплоносителя и металле парогенератора и образование электронно-позитронных пар в результате одноименного эффекта. Воздействие ИИ на металл парогенератора приводит к ухудшению ряда его механических свойств и коррозионной стойкости. Быстрые частицы, проходя через металлические материалы, отдают значительную часть своей энергии в небольшой области решетки, вызывая плавление в микроскопических объемах.

Отвердевание этих объемов происходит чрезвычайно быстро, что приводит к образованию сильно напряженных участков. Они оказывают такое же действие на свойства металла, как и обычная закалка, а именно: увеличиваются твердость и прочность, но снижается пластичность и уменьшается плотность. Длина пробега заряженных частиц (электронов, позитронов) в металле незначительна, поэтому они создают повреждения лишь в поверхностном слое. Степень изменения свойств и число дефектов в металле при облучении зависит от суммарного потока частиц, температуры облучения и температуры рекристаллизации металла⁷.

При радиационном облучении кроме механических изменяются также химические и физические свойства материалов, например, повышается температура перехода в хрупкое состояние, увеличивается скорость коррозии. Суть последнего сводится к следующему. Для многих конструкционных реакторных материалов, коррозионной средой является вода, влажный или перегретый пар. В результате электро-

химическая коррозия⁸ может сопровождаться химической. При облучении стойкость металлов в условиях химической коррозии снижается из-за разрушения поверхностных защитных пленок. Кроме того, при облучении происходит радиолиз воды: ее молекулы разрушаются и образуются ионы, атомы кислорода, водорода и группы ОН. Кислород окисляет металл, водород интенсивно внедряется в него «наводороживает» металл и, тем самым, охрупчивает, усиливая электрохимическое разрушение металла⁹, что и способствует условиям для образования трещин. Облучение аустенитных хромоникелевых сталей также усиливает их коррозию за счет выделения карбидов по границам зерен, которое существенно усиливается при облучении. Во влажном паре оно способствует развитию местных видов коррозии – межкристаллической, точечной, а также коррозионному растрескиванию: на рисунке 8 представлены зерна растрескивания с увеличением в 300 раз (а) и в 500 раз (б).

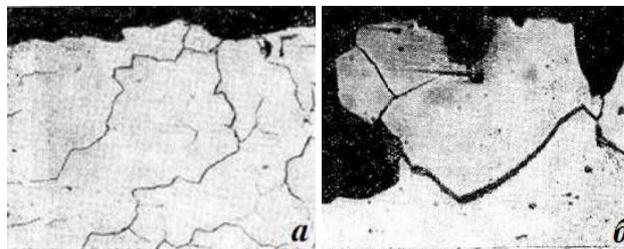


Рисунок 8. Микроструктура аустенитной нержавеющей стали, пораженной интеркристаллитной коррозией
Figure 8. Microstructure of austenitic stainless steel affected by intergranular corrosion

Таким образом, при оценке формирования рассмотренного выше эффекта – образования трещин в парогенераторе необходимо в первую очередь учитывать периодические колебания системы вода-пар в парогенераторе, характеризующие формирование области, в которой периодически происходит замещение пара водой и наоборот. В этой области под действием указанных замещений в металлической оболочке парогенератора возникают как механические эффекты, обусловленные давлением пара в паропроводе, температурные, связанные с изменением внутренних напряжений в металле паропровода, которые способствуют возникновению трещин, через которые радионуклиды, растворенные в теплоносителе, омывающем паропровод, могут проникать в паропровод и выбрасываться с паром на турбину. При этом нельзя,

⁸ В результате физико-химических процессов, возникающих при взаимодействии металла с омывающей его средой, может возникать процесс разрушения металла, который называют коррозией. Если коррозионный процесс сопровождается протеканием электрического тока, его называют электрохимической коррозией. Сущность электрохимической коррозии состоит в том, что при соприкосновении металла с электролитами создаются условия для возникновения на поверхности обратимых и необратимых электродов, разность потенциалов которых и обуславливает наличие коррозионного тока, который и характеризует эффект.

⁹ См. постраничную ссылку 6.

⁷ Влияние облучения на структуру и свойства материалов. Справочный материал. – Режим доступа: https://studopedia.su/12_66323_vliyanie-oblucheniya-na-strukturu-i-svoystva-materialov.html (дата обращения: 16.09.2023)

очевидно, не учитывать и особенности воздействия ионизирующего излучения радионуклидов, растворенных в теплоносителе, благодаря которым ионизация сред (теплоноситель-парогенератор) вкупе с повышенной температурой приводит к ухудшению механических и коррозионных свойств парогенератора. Так же нельзя исключать и синергетический эффект, в результате которого суммарный эффект может оказаться значительно больше, чем просто сумма результатов воздействия от каждого в отдельности, однако для решения этих проблем должны привлекаться металлурги, химики, технологи и др., т.е. специалисты, занимающиеся вопросами разработки и создания парогенераторов.

Оценка мощности вброса азота $^{16}\text{N}_7$ в паропровод парогенератора

Значительно продвинувшись в понимании механизма образования микротрещин в паротрубопроводе парогенератора, целесообразно уточнить величину мощности вброса P_v [Ки/с], представляющей собой величину активности радионуклида, поступающего в паропровод в единицу времени из теплоносителя первого контура в паропровод парогенератора, которая в работах автора [3–6] определялась на основе измерений эквивалентной мощности дозы, создаваемой радиоактивным азотом $^{16}\text{N}_7$, и массы пара, выходящих с паром на турбину. Суть оценки состояла в вычислении интеграла, представляющего аналитическое выражение эквивалентной мощности дозы, и этой же величины, измеряемой высокотемпературным γ -детектором [15], в момент времени прохождения пара по паропроводу $\tau_n = L/\bar{v}_n$, где L – длина паропровода; \bar{v}_n – средняя скорость переноса пара в паропроводе. Расчет аналитического выражения осуществлялся в рамках модели, учитывающей образование (наработку) пара и его перенос по паропроводу с выходом на турбину. Сравнение расчетной и измеряемой величин позволяет получить аналитическое выражение (58) для мощности вброса в виде:

$$P_v = \left\{ \left[D'_N(L, \tau_n) \cdot \lambda \right] / A_0 - (B_2 \times A_2 + B_3 \times A_3) \right\}, \quad (58)$$

где $D'_N(L, \tau_n)$ – измеряемая эквивалентная мощность дозы;

K – размерный коэффициент ($K = 1,456 \cdot 10^3$ мЗв/час); E_N (МэВ),

v_N – энергия и квантовый выход γ -излучения азота $^{16}\text{N}_7$ соответственно;

μ , μ_a – линейный коэффициент и коэффициент передачи энергии γ -излучения (м^{-1}) соответственно;

$$a = \mu \cdot (\bar{\rho}_n / \rho_{\text{возд}});$$

$$b = 1/L;$$

$$A_0 = [KE_N v_N (E_N) \mu_a \cdot (\bar{\rho}_n / \rho_{\text{возд}}) S_n];$$

$$A_1 = \left\{ \left(-\frac{\exp[-a(l_{vr}/2)]}{l_{vr}/2} + aEi[-a(l_{vr}/2)] \right) - \right.$$

$$\left. - \left(\frac{\exp[a(l_{vr}/2)]}{l_{vr}/2} + aEi[a(l_{vr}/2)] \right) \right\}$$

$$A_2 = \left\{ \left(-\frac{\exp[-(a+b)L]}{L} + (a+b) \times Ei[-(a+b)L] \right) - \right.$$

$$\left. - \left(\frac{\exp[(a+b)l_{vr}/2]}{l_{vr}/2} + (a+b)Ei[(a+b)l_{vr}/2] \right) \right\}$$

$$A_3 = \left\{ \left(-\frac{\exp[-aL]}{L} + aEi[-aL] \right) - \right.$$

$$\left. - \left(\frac{\exp[a(l_{vr}/2)]}{l_{vr}/2} + aEi[a(l_{vr}/2)] \right) \right\}$$

$$B_1 = \left\{ \frac{1 - \exp(-\lambda L / \bar{v}_n)}{\pi R_1^2 L} \right\};$$

$$B_2 = \left\{ \frac{\bar{v}_n \alpha_N V_n [1 - \exp(-\lambda L / \bar{v}_n)]}{e \pi R_1^2 L (L_s - L_0)} \left[\bar{\rho}_n(T) - \bar{\varphi}(T) \frac{2L_0}{R_1} \right] \right\};$$

$$B_3 = [\lambda Q_N(L_0) / \pi R_1^2 L] \cdot \exp(-\lambda \cdot L / \bar{v}_n);$$

α_N [Ки/кг] – параметр, определяющий содержание активности азота в выходящей массе пара за время τ_n ;

$Ei(x)$ – интегральная показательная функция;

L_0 – длина водо-паропровода, заполняемая водой для образования пара;

L_s ($L_s = L_0 + L$) – общая длина водо-паропровода;

λ – постоянная распада азота $^{16}\text{N}_7$;

$\bar{\varphi}(T)$ – среднее значение по температуре отношения скорости парообразования $u_n(T)$ к скорости переноса пара по паропроводу $v_n(T)$ ($\varphi(T) = u_n(T)/v_n(T)$) в диапазоне температур $170 \leq T \leq 290$ °С;

$\bar{\rho}_n(T)$ – среднее значение плотности пара в указанном диапазоне;

l_{vr} – длина микротрещины в рассматриваемой области парогенератора;

T_s – температура пара при выходе его на турбину;

$Q_N(L_0)$ – активность азота $^{16}\text{N}_7$, образующегося в пограничной области паропровода пар-вода.

$S_n = \pi R_1^2$ – площадь поперечного сечения паропровода.

Величину $Q_N(L_0)$ находят из выражения (59) [3-6]:

$$\alpha_N = \frac{Q_N(L_0) \exp(-\lambda \tau_n)}{\left\{ V_n \rho_n(T_s) + \frac{\bar{v}_n V_n}{(L_s - L_0)} \left[\varphi(T_s) \frac{2L_0}{R_1} - \rho_n(T_s) \right] \frac{[1 - \exp(-\lambda \tau_n)]}{\lambda} \right\}}. \quad (59)$$

в котором величину α_N определяют экспериментально, измеряя за небольшой промежуток времени $\tau \sim T_{1/2}$ азота $^{16}\text{N}_7$ активность радионуклида и массу пара, вышедших в помещение за это время, после чего находят искомую величину $Q_N(L_0)$. Мощность

«вброса» P_b , согласно проведенным расчетам, составляет $7,767 \cdot 10^4$ Ки/с.

Фактически расчет по формуле (58) повторяет расчет, приведенный в работах [3–6], с той лишь разницей, что в настоящей работе учитывается длина микротрещины, полученная по формуле (57), т.е. с учетом механизмов ее образования, тогда, как в указанных предыдущих работах, ее длина определялась максимальной разностью хода воды ΔL_0 , (табл. 3). С другой стороны, величина P_b определяется известным выражением (60) [16]:

$$P_b = Q_V \cdot G_N, \quad (60)$$

где Q_V – объемная активность радионуклида, в частности, радиоактивного азота в области вода-пар [Ки/м³] ($Q_V(L_0) = Q_N(L_0)/\pi R_1^2 l_{vr}$);

$G_N = 2\pi R_1 l_{vr} \cdot U_r$ – секундный расход «вброса» [м³/с] радиоактивного азота $^{16}\text{N}_7$ в паровую фазу в пограничной области, представляющий собой произведение площади пограничной области паропровода $S_{пр} = 2\pi R_1 l_{vr}$, на скорость выхода радиоактивного азота из трещин U_r .

Следует заметить, что рассматриваемая площадь, через которую происходит вброс радионуклида азота $^{16}\text{N}_7$ в парогенератор при протечке, строго говоря, не является реальной площадью. Это некая эффективная площадь, используемая в решаемой задаче на основании того, что реальную ширину трещин не представляется возможным определить. Из выражения (60) при найденном $Q_V(L_0)$ находим указанный параметр ($G_N = 2\pi R_1 l_{vr} \cdot U_r$) или скорость «вброса» U_r радиоактивного азота $^{16}\text{N}_7$ и, таким образом, получаем расчетную оценку его протечки.

Таблица 3. Длина водного участка парогенератора $L_{0,м}$ [3-6]

Table 3. Length of the steam generator water section $L_{0, м}$ [3-6]

$P_{гр}, \text{МПа}$		6,24	6,4	6,56
$L_s, \text{м}$	10	0,7534	0,7636	0,7739
	20	0,8944	0,9063	0,9124
	35	0,983	0,9965	1,01
Максимальная разность «хода» воды в водо-паропроводе ΔL_0 и длина микротрещины $l, \text{м}$				
$L_s, \text{м}$		ΔL_0		l_{vr}
	10	0,0205		0,031
	20	0,024		0,042
	35	0,027		0,056

Таким образом, если принять, что в результате протечки, радиоактивный пар, выходящий из паропровода, создает мощность дозы сравнимую с радиационным фоном реактора 500 мкР/ч, т.е. 5 мкЗв/ч, то при найденных остальных параметрах ($Q_N(L_0) = 0,176$ Ки) и скорости поступления пара на турбину $v_0 = 50$ м/с, величина α_N составит 0,031 Ки/кг и линейно будет возрастать или уменьшаться в соответствии с мощностью реактора, а скорость «вброса» U_r составит $1,44 \cdot 10^3$ м/с. Грубую оценку U_r можно получить, исходя из размерности мощности «вброса». Действительно, если P_b известна, то время, за которое активность радиоактивного азота $Q_N(L_0)$ образуется в паропроводе в пограничной области, найдем из отношения $\tau = Q_N(L_0)/P_b$, а скорость «вброса» определим, как $U_r = l_{vr}/\tau$, что для l_{vr} (см. табл. 3) составляет от $1,37 \cdot 10^4$ до $2,47 \cdot 10^4$ м/с, что свидетельствует о корректности ранее полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Иванов Е.А., Пырков И.В., Хамьянов Л.П. Модель накопления радионуклидов в котловой воде парогенераторов АЭС с ВВЭР-440 и -1000. *Атомная энергия*. 1994;77(1):58–63. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4940> (дата обращения: 16.09.2023).
- Иванов Е.А., Пырков И.В., Хамьянов Л.П. Методика диагностики протечки теплоносителя первого контура в котловую воду парогенераторов АЭС с ВВЭР-440 и -1000. *Атомная энергия*. 1994;77(1):51–58. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4939> (дата обращения: 16.09.2023).
- Елохин А.П., Федорченко С.Н. Способ оценки протечки радиоактивного азота $^{16}\text{N}_7$ в парогенераторах, используемых на ядерных реакторах типа КЛТ-40. *Патент РФ №2754755*, бюл. № 25 от 07.09.2021. Приоритет от 31.12.2020. Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/RU2754755C1/ru> (дата обращения: 16.09.2023).
- Елохин А.П., Федорченко С.Н. Расчетно-измерительный метод оценки протечки радиоактивного азота $^{16}\text{N}_7$ в парогенераторах, используемых на ядерных реакторах типа КЛТ-40. *Глобальная ядерная безопасность*. 2021;4(41):16–30. <https://doi.org/10.26583/gns-2021-04-02>
- Elokhin A.P., Fedorchenko S.N. Determination of the leakage area of radioactive nitrogen ^{16}N in steam generators in reactors of KLT-40 type. *Physics of Atomic Nuclei*. 2022;85(2):S42–S49. ISSN 1063-7788. <https://doi.org/10.1134/S106377882214006X>
- Elokhin A.P., Fedorchenko S.N. Calculation and instrumentation method of assessment of radioactive nitrogen $^{16}\text{N}_7$ leaks in steam generators applied at KLT-40 type nuclear reactors. *AIP (American Institute of Physics) Conference Proceedings (published online 09 March 2023)*. 2023. Vol. 2700. P. 050017-050017-15. <https://doi.org/10.1063/5.0125107>
- Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. Москва: Наука, 1966. 724 с. Режим доступа: <https://studizba.com/files/show/djvu/3304-1-umf-tihonov.html> (дата обращения: 16.09.2023).
- Арсенин В.Я. Математическая физика. Основные уравнения и специальные функции. Москва: Наука, 1966. 367 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005948961> (дата обращения: 16.09.2023).
- Зайцев В.Ф., Полянин А.Д. Справочник по линейным обыкновенным дифференциальным уравнениям. Москва: Факториал, 1997. 303 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001763480> (дата обращения: 16.09.2023).
- Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами. М. Абрамовиц, Д. Липман, А. Мак Ниш и др.; под ред. М. Абрамовица и И. Стиган; пер. с англ. под ред. В.А. Диткина и Л.Н. Кармазиной. Москва: Наука, 1979. 832 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007759009> (дата обращения: 16.09.2023).

11. Прудников, А.П., Брычков Ю.А. Маричев О.И. Интегралы и ряды. Специальные функции. Москва: Наука, 1983. 750 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001177065> (дата обращения: 16.09.2023).

12. Проскуряков К.Н., Беликов С.О., Адаменков А.К., Костин А.В. Прогнозирование возникновения акустических резонансов в системе генерации и транспортировки пара АЭС с ВВЭР. *Глобальная ядерная безопасность*. 2012;2-3(4):70–75. Режим доступа: https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb_2-34.pdf (дата обращения: 16.09.2023).

13. Исакович М.А. Общая акустика. Москва: Наука, 1973. 495 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007129077> (дата обращения: 16.09.2023).

14. Лепендин Л.Ф. Акустика. Москва: Высшая школа. 1978, 448 с. Режим доступа: <https://books.totalarch.com/node/5238> (дата обращения: 16.09.2023).

15. Елохин А.П., Ксенофонтов А.И., Исса Алалем, Федорченко С.Н. Метод экспресс-оценки средней энергии спектра γ -излучения радионуклидов в условиях радиационных аварий в помещениях спецкорпуса АЭС. *Глобальная ядерная безопасность*. 2018;2(27):7–15. Режим доступа: <https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb.2018.2.pdf> (дата обращения: 16.09.2023).

16. Елохин А.П. Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды. Монография. Москва: НИЯУ МИФИ, 2014. 520 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007901898> (дата обращения: 16.09.2023).

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

FUNDING:

The study had no external funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ:

Александр Прокопьевич Елохин, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», член-корреспондент РАН, Москва, Российская Федерация.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7682-8504>

e-mail: elokhin@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR:

Alexander P. Elokhin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Associate Member of Russian Academy of Natural Sciences, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7682-8504>

e-mail: elokhin@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.10.2023

После доработки 24.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

Received 11.10.2023

Revision 24.11.2023

Accepted 30.11.2023

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 620.19: 621.039.5

<https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-06>

EDN TRKSTY



Оценка метода измерения параметров магнитной анизотропии
для возможности контроля развития эрозионно-коррозионного
износа оборудования

А.К. Адаменков¹ , И.Н. Веселова²  

¹АО «Атомстройэкспорт», г. Москва, Россия

²Волгодонский инженерно-технический институт – филиал научного исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Россия

 INVeselova@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты дальнейших исследований в области оценки развития эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ) элементов трубопроводов с помощью магнитно-анизотропного метода контроля напряженно-деформированного состояния ферромагнитного материала. Проведенные исследования показали, что регистрируемые параметры магнитно-анизотропного метода, такие как разность главных механических напряжений (РГМН), позволяют однозначно установить количественное соответствие уровню действующих в контролируемой зоне напряжений. Доказана возможность определения соответствия уровня действующих напряжений величине РГМН, фиксируемой сканером StressVision при обследовании конструкции. Показано, что для организации мониторинга развития ЭКИ с использованием магнитно-анизотропного метода необходимо периодически контролировать изменения РГМН и её дисперсии и, при фиксации точек пресечения, назначать дополнительные обследования другими, более трудоемкими, методами. Подтверждена возможность организации мониторинга развития ЭКИ оборудования на основе использования механизма прогнозирования ресурса трубопровода в соответствии с положениями нормативной документации.

Ключевые слова: метод магнитоанизотропии, мониторинг эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ) металла, зона пластических деформаций, оценка напряженного состояния, цикличность нагружения.

Для цитирования: Адаменков А.К., Веселова И.Н. Оценка метода измерения параметров магнитной анизотропии для возможности контроля развития эрозионно-коррозионного износа оборудования. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(4):46–50. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-06>

For citation: Adamenkov A.K., Veselova I.N. Evaluation of measuring magnetic anisotropy parameters method to monitor the development of erosion and corrosion wear of equipment. *Global nuclear safety*. 2023;13(4):46–50 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-06>

Evaluation of measuring magnetic anisotropy parameters method to monitor the development
of erosion and corrosion wear of equipment

Andrey K. Adamenkov¹ , Irina N. Veselova²  

¹JSC Atomstroyexport, Moscow, Russian Federation

²Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russia

 INVeselova@mail.ru

Abstract. The paper presents the results of further research in the field of assessing the development of erosion and corrosion wear (ECW) of pipeline elements using a magnetic and anisotropic method to monitor the stress-strain state of ferromagnetic material. The conducted studies show that the recorded parameters of the magnetic anisotropic method, such as the principal mechanical stress difference, make it possible to unambiguously establish a quantitative correspondence to the level of stresses operating in the controlled zone. The possibility of determining the correspondence of the level of effective stresses to the value of the principal mechanical stress difference recorded by the StressVision scanner during the inspection of the structure is proven. The paper shows that in order to organize monitoring of the development of ECW using the magnetic anisotropic method it is necessary to monitor periodically changes in the principal mechanical stress difference and its dispersion and when fixing cut-off points, prescribe additional examinations with other more labor-intensive methods. The possibility of organizing monitoring of ECW equipment development based on the use of a pipeline resource forecasting mechanism in accordance with the provisions of regulatory documentation is confirmed.

Keywords: magnetoanisotropy method, monitoring of erosion and corrosion wear (ECW) of metal, plastic deformation zone, stress state assessment, loading cyclicly.

В настоящее время российская атомная отрасль является одной из передовых в мире по опыту эксплуатации атомных станций, квалификации персонала АЭС. Возрастающие требования нормативных документов к безопасности АЭС и конкурентная борьба на энергетическом мировом рынке определяют требования по научно-технологическому совершенствованию отрасли¹. Действующими нормами и правилами Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору² установлены требования к управлению ресурсом оборудования и трубопроводов атомных станций. В частности, определена необходимость проведения мониторинга и прогнозирования тенденций механизмов деградации оборудования и трубопроводов АЭС и их материалов. Постоянное совершенствование способов обнаружения проявлений механизмов деградации, периодичность их контроля, а также анализ результатов контроля должны обеспечивать выявление механизмов деградации на ранней стадии их проявления и принятие своевременных мер до возникновения необратимых последствий из-за их развития.

Для трубопроводов и оборудования второго контура определяющим аспектом управления ресурсом является мониторинг эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ) металла³.

В предыдущих работах показана возможность эффективного мониторинга ЭКИ трубопроводов с помощью регулярного (периодического) обследования их потенциально опасных участков методом магнитной анизотропии [1, 2]. Показана достаточная информативность зависимости одного из критерия данного метода – разность главных механических напряжений (РГМН) от изменения толщины участка модели трубопровода.

С целью определения зависимости количественных значений РГМН от действующих напряжений в материале трубопровода проведены натурные испытания образцов, изготовленных из металла, аналогичному материалу трубопроводов. Для испытаний были

изготовлены образцы из сталей Ст3 и 10ГНМФА с размерами 200x60x8 мм (рис. 1) с нанесенной на них сеткой 15x15 мм и концентратором напряжений типа «прямоугольный паз»⁴.

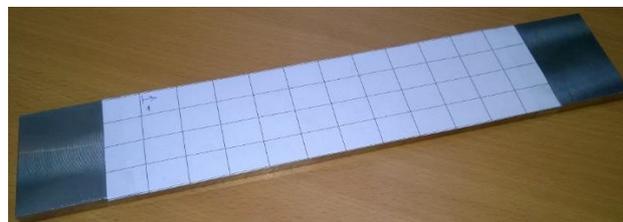


Рисунок 1. Фотография испытываемого образца
Figure 1. A photo of the test specimen

Механические свойства сталей Ст3 и 10ГНМФА представлены в таблицах 1 и 2, где σ_b – предел кратковременной прочности, МПа; σ_T – предел пропорциональности (предел текучести для остаточной деформации), МПа; δ_5 – относительное удлинение при разрыве, (%).

Таблица 1. Механические свойства Ст3
Table 1. Mechanical properties of St3

Сортамент	δ_b , МПа	δ_T , МПа	δ_5 , %
ТУ 0893-014-00212179-2004	370-490	205-255	24

Таблица 2. Механические свойства 10ГНМФА
Table 2. Mechanical properties of 10GNMVA

Сортамент	σ_b , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %
ТУ 0893-014-00212179-2004	540-700	345-590	16

Образцы размещались в захватах машины разрывной Р-50 для последующего постепенного нагружения. Выполнялось поэтапное нагружение образца с шагом 25 кН с выдержкой времени для выполнения:

- обследования зоны предполагаемого разрушения с помощью сканера механических напряжений «StressVision»⁵ [3];
- измерения утонения зоны пластических деформаций.

Нагружение выполнялось до момента разрушения образца (рис. 2)

¹ Атомная энергетика в России до 2035 года. – ООО «Издательский дом Энергетика и промышленность». – Режим доступа: <https://www.eprussia.ru/market-and-analytics/4925570.htm> (дата обращения: 21.07.2023).

² Методика оценки технического состояния остаточного ресурса трубопроводов энергоблоков АЭС. – Утверждена и введена в действие приказом концерна «Росэнергоатом» от 27.06.2000 № 318. – Руководящий документ РД-ЭО-0185-00. – Режим доступа: <https://a3-eng.com/assets/files/8434/rd-EO-185-00.pdf> (дата обращения: 21.07.2023).

³ Требования к управлению ресурсом оборудования и трубопроводов атомных станций. Основные положения. – Введены в действие приказом Ростехнадзором от 15.10.2015 № 410. – Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии НП-096-15. – Режим доступа: <https://docs.secncs.ru/documents/nps/НП-096-15/НП-096-15.pdf> (дата обращения: 21.07.2023).

⁴ Александров А.В. Сопrotивление материалов. – 3-е изд. – Москва: Высшая школа, 2003. – С. 380-383. – Режим доступа: https://pnu.edu.ru/media/filer_public/2013/04/10/21_alexandrov-potapov_sopromat2003.pdf (дата обращения: 17.07.2023).

⁵ Сканер механических напряжений «Stressvision®» Expert, версия 2.013. Паспорт ФЛ 413.175.001 ПС ТУ 4276-007-82237826-13. – Режим доступа: <https://stressvision.ru/stressvision-expert/> (дата обращения: 17.07.2023).



Рисунок 2. Фотография момента разрушения
Figure 2. A photo of destruction moment

Действующие напряжения оценивались расчетным путем как отношений действующего усилия к поперечному сечению образца. Так получены результаты испытаний, представленные в таблицах 3, 4.

Таблица 3 – Формат фиксируемых результатов испытаний образца из стали 10ГНМФА толщиной 8 мм
Table 3. Format of recorded test results of 8 mm thick 10GNMVA steel specimen

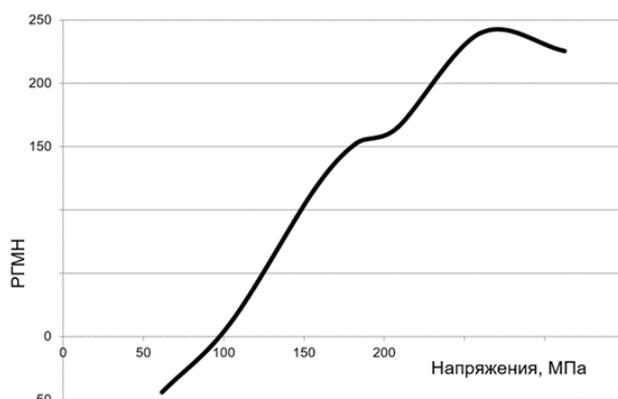
Усилия растяжения, кН	Ширина образца, мм	Действующее напряжение, МПа
25	60	52,1
50	60	104,2
...
200	57,3	436,3
225	55,8	504,0
250	Разрушение образца	

Таблица 4. Параметры безразмерной величины РГМН и дисперсии образца из стали 10ГНМФА толщиной 8 мм
Table 4. Parameters of dimensionless value of principal mechanical stress difference and dispersion of 8 mm thick 10GNMVA steel specimen

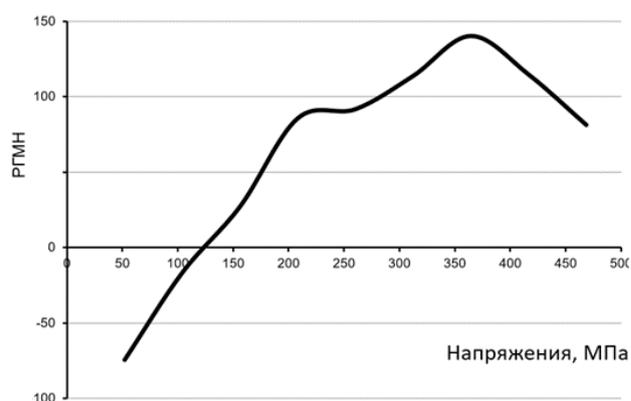
РГМН	Дисперсия
176,89	124957
233,69	119403
...	...
332,96	96517,6
361,72	96313,4

Результаты обследования образца, выполненные сканером механических напряжений «StressVision» фиксировались в памяти прибора. Алгоритм обработки данных, реализованный в программном обеспечении устройства, позволяет оценивать, кроме прочих значений⁶, РГМН и дисперсию как безразмерных величин (см. табл. 4).

Обработка результатов позволила построить графические зависимости величины РГМН для каждого образца от уровня действующих в сечении напряжений (рис. 3).



а) Ст 3



б) 10ГН2МФА

Рисунок 3. Графики зависимости величины РГМН от уровня напряжений для каждого материала
Figure 3. Diagrams of dependence of principal mechanical stress difference value on the stress level for each material

Построение графических зависимостей устанавливает однозначное соответствие величины РГМН действующему уровню напряжения при, в нашем случае, одноосном нагружении. Анализ полученных зависимостей указывает на аналогичность полученных зависимостей «РГМН – напряжение» кривым «деформация–напряжение». С другой стороны, наличие на графике экстремума не позволяет провести однозначную идентификацию контролируемой зоны в окрестностях этой точки.

Учитывая то, что физический смысл дисперсии – это площадь, на которой происходит рассеяние параметра, выполнена дальнейшая обработка зафиксированных данных (рис. 4). А именно, построены графики зависимости нормированных значений РГМН и отношения РГМН к его дисперсии в каждом опыте. Полученные графические зависимости позволяют сделать предположение о том, что точки пересечения кривых, в которых вычисляемые значения частных производных меняют знак [4, 5], характеризуют начало этапов структурных изменений материалов:

- точка 1 – завершение области упругих деформаций материала;
- точка 2 – завершение пластических деформаций.

⁶ См. постраничную ссылку 5.

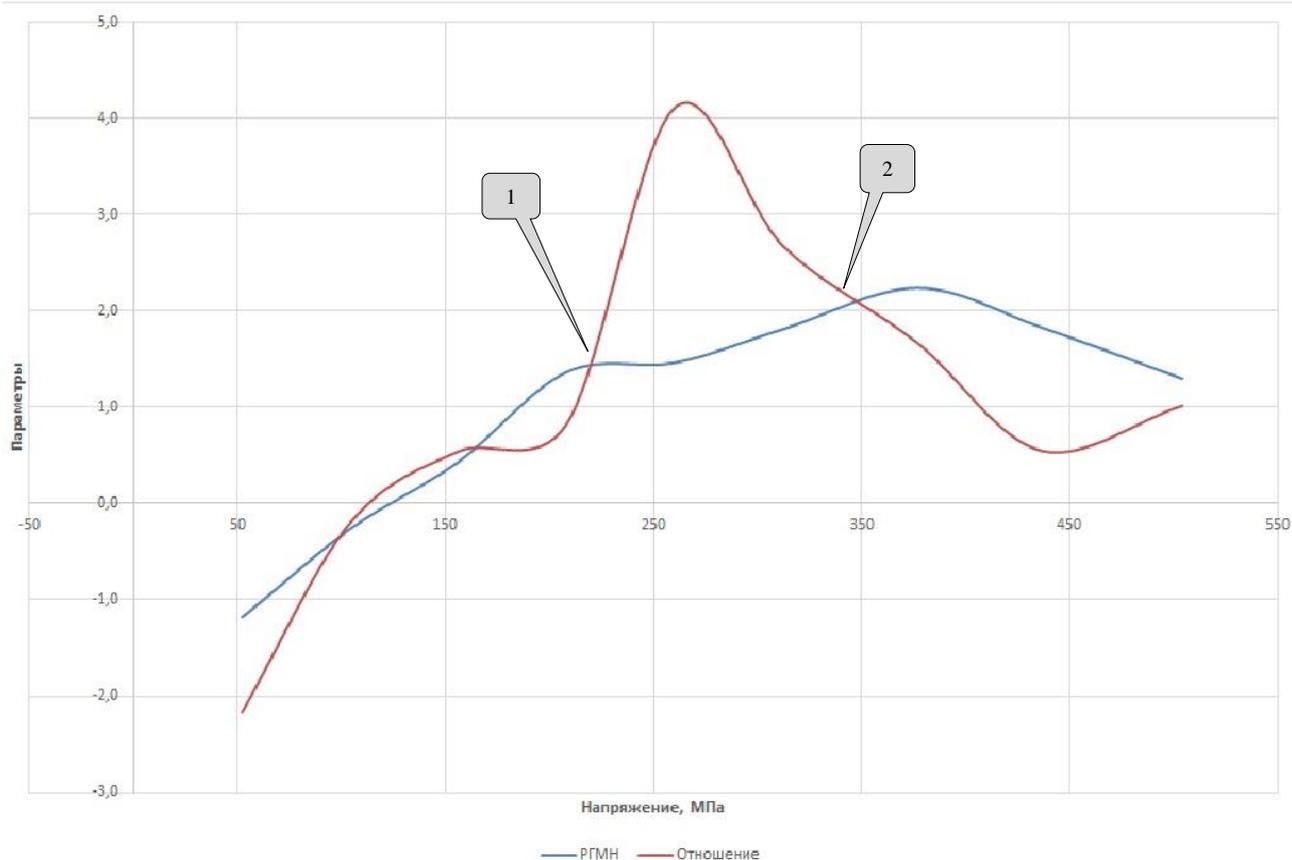


Рисунок 4. Графики изменения нормированных значений РГМН величины отношения РГМН к его дисперсии
 Figure 4. Diagrams of changes in standardized principal mechanical stress difference values of the ratio to its dispersion

Аналогичные графические зависимости характерны и для образца из стали 3.

Оценивая уровни НДС конструкции, можно утверждать, что достижение материала конструкции области начала пластической деформации является недопустимым фактором при развитии ЭКИ [6].

Полученные данные позволяют установить соответствие величины РГМН и величины напряжений, действующих в контролируемой области конструкции.

Выводы:

1. Доказана возможность определения соответствия уровня действующих напряжений величине РГМН, фиксируемых сканером StressVision при обследовании конструкции.

2. Показано, что для организации мониторинга развития ЭКИ [2] с использованием магнитно-анизотропного метода необходимо периодически контролировать изменения РГМН и её дисперсии и, при фиксации точек пресечения, назначать дополнительные обследования другими, более трудоемкими, методами.

3. Учитывая монотонный характер изменения во времени величины РГМН при организации мониторинга возможно использование механизма прогнозирования ресурса трубопровода в соответствии с положениями¹ [7], приняв при этом в качестве предельного значения диагностического параметра значение РГМН, соответствующее пределу текучести материала.

4. При разработке технологии обследования сканером StressVision, первым этапом должно быть испытание образца, из которого изготовлены конструкции, во время его нагружения при тензометрическом сопровождении.

¹ Нормы допускаемых толщин стенок элементов трубопроводов из углеродистых сталей при эрозионно-коррозионном износе. – Введены в действие приказом АО «Концерн Росэнергоатом» от 06.08.2015 №9/876-П. – Руководящий документ РД ЭО 1.1.2.11.0571-2015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Томаров Г.В., Шипков А.А., Комиссарова Т.Н. Эрозионно-коррозионный износ энергетического оборудования: исследование, прогнозирование и предупреждение. Ч. 2. Прогнозирование и предупреждение общей и локальной эрозии-коррозии. *Теплоэнергетика*. 2018;8:17–28. <https://doi.org/10.1134/S0040363618080076>
2. Адаменков А.К., Веселова И.Н. Моделирование эрозионно-коррозионного износа трубопроводов и мониторинг его развития на основе магнитоанізотропного метода. *Глобальная Ядерная Безопасность*. 2021;(3):68–74. <https://doi.org/10.26583/gns-2021-03-07>
3. Жуков С.В., Жуков В.С., Копица Н.Н. Способ определения механических напряжений и устройство для его осуществления. Патент РФ, № 2195636. 2002. 18 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002195636_20021227_C2_RU/ (дата обращения: 17.07.2023).
4. Адаменков А.К., Веселова И.Н., Шпицер В.Я. Оценка развития эрозионно-коррозионного износа с помощью метода измерения магнитной анизотропии. *Глобальная ядерная безопасность*. 2019;9(1):113–119. Режим доступа: <http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2019.1.3.5.pdf> (дата обращения: 17.07.2023).
5. Sakai Y., Unishi H., Yahata T. Non-destructive method of stress evaluation in linepipes using magnetic anisotropy sensor. *Jfe technical report*. 2004;3. Available at: <https://www.jfe-steel.co.jp/en/research/report/003/pdf/003-09.pdf> (accessed: 29.07.2023).
6. Ничипурук А.П., Сташков А.Н., Огнева М.С., Кулеев В.Г., Царькова Т.П., Костин В.Н. О возможности использования магнитных методов для оценки уровня одноосных пластических деформаций и остаточных напряжений в низкоуглеродистых сталях. *Сварка и диагностика: сборник докладов международного форума. Екатеринбург, 25-27 ноября 2014 г.* Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 201–207. Режим доступа: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/30919/1/sid_2014_33.pdf (дата обращения: 29.07.2023).
7. Бараненко В.И., Маркочев В.М., Янченко Ю.А. Эксплуатационный контроль эрозионно-коррозионного износа трубопроводов на российских АЭС с ВВЭР. *Теплоэнергетика*. 2011;5; 41–48. Режим доступа: http://tepen.ru/uploads/archive/2011/05_11.pdf (дата обращения: 29.07.2023).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Адаменков А.Н. – разработка технологии проведения эксперимента, проведение эксперимента, обработка результатов эксперимента;

Веселова И.Н. – разработка концепции сравнительного эксперимента и оценки результатов, проведение эксперимента, оформление текста статьи.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Adamenkov A.K. – development of the experiment technology, conducting the experiment, processing the results of the experiment;

Veselova I.N. – development of the concept of a comparative experiment and evaluation of the results, conducting the experiment, design of the text of the article.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Без дополнительного финансирования.

FUNDING:

No additional funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare no conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Андрей Константинович Адаменков, к.т.н., главный эксперт дирекции пуско-наладочных работ АО «Атомстройэкспорт», Москва, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7342-0231>

WoS: O-1921-2018

e-mail: anri_61@mail.ru

Ирина Николаевна Веселова, к.т.н., доцент кафедры атомной энергетики Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5867-5690>

WoS: M-1893-2018

e-mail: INVeselova@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Andrey K. Adamenkov, Cand. Sci. (Eng.), Chief Expert of the Commissioning and Start-up Directorate of JSC Atomstroyexport, Moscow, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7342-0231>

WoS: O-1921-2018

e-mail: anri_61@mail.ru

Irina N. Veselova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Nuclear Engineering Department, Volgogradsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MPhI»; Volgogradsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5867-5690>

WoS: M-1893-2018

e-mail: INVeselova@mail.ru

Поступила в редакцию 06.10.2023

После доработки 27.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

Received 06.10.2023

Revision 27.11.2023

Accepted 30.11.2023

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.54:621.039.524.441
<https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-07>
EDN VKHUTB



**Анализ и оптимизация внутрикассетной неравномерности
энерговыведения и выгорания топлива ВВЭР-1000**

А.А. Лапкис^{1,2}  , А.С. Старченко¹ , Д.В. Тришечкин¹ , И.Ю. Попова¹

¹Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл.

²Ростовская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Волгодонск, Ростовская обл., Россия
 aalapkis@mephi.ru

Аннотация. В данной работе рассмотрены и систематизированы варианты тепловыделяющих сборок (ТВС) для реактора ВВЭР-1000. В нейтронно-физическом коде Serpent смоделирована бесконечная по высоте ТВС с шестью твэгами по образцу U49G6, применяемой в топливных загрузках ВВЭР-1000 «большой серии». В результате расчетов были выбраны варианты размещения твэгов с меньшей неравномерностью энерговыведения по ТВС, и проведена оценка влияния количества твэгов и их размещения на реактивность. Показано, что размещение твэгов в четвёртом кольце оптимально с точки зрения неравномерности потвэльного энерговыведения и глубины выгорания. Рассмотрено влияние компоновки ТВС на глубину выгорания топлива по отдельным группам твэлов. Предложен вариант сокращения затрат вычислительных ресурсов путём выделенных наиболее различающихся по энерговыведению и выгоранию групп твэлов. Проведено сравнение исследуемых сборок с существующей ТВС типа U49G6. Предложен способ оценить недопроизводство тепловой энергии в ТВС, связанную с неравномерностью выгорания твэлов в ней, при сохранении максимальной глубины выгорания по отдельным твэлам на уровне существующих образцов. На основе анализа величины недопроизводства предложен вариант совершенствования компоновки ТВС с шестью твэгами для выравнивания поля энерговыведения и сокращения непроизводительных потерь топлива. Для этого может быть снижено обогащение в первом, втором и десятом кольцах твэлов, считая от центральной трубы ТВС. В результате такого профилирования глубина выгорания наиболее выгоревших твэлов в кассете может быть снижена до 1,015 от средней по ТВС.

Ключевые слова: твэг, ТВС, ВВЭР-1000, реактивность, гадолиний, энерговыведение, выгорание, глубина выгорания, Serpent.

Для цитирования: Лапкис А.А., Старченко А.С., Тришечкин Д.В., Попова И.Ю. Анализ и оптимизация внутрикассетной неравномерности энерговыведения и выгорания топлива ВВЭР-1000. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(4):51–59. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-07>

For citation: Lapkis A.A., Starchenko A.S., Trishechkin D.V., Popova I.Yu. Analysis and optimization of energy release and fuel burnup nonuniformity in the WWER-1000 fuel assembly. *Global nuclear safety*. 2023;13(4):51–59 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-07>

**Analysis and optimization of energy release and fuel burnup nonuniformity
in the WWER-1000 fuel assembly**

**Aleksandr A. Lapkis^{1,2}  , Aleksandr S. Starchenko¹ , Dmitry V. Trishechkin¹ ,
Irina Yu. Popova¹**

¹Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russia

²Rostov Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russia
 AALapkis@mephi.ru

Abstract. The paper considers and systematises the options of fuel assemblies (FAs) for the WWER-1000 reactor. In the Serpent neutron-physics code, an infinite-height fuel assembly with six fuel pins is modelled using the U49G6 pattern used in the WWER-1000 «large series» fuel assemblies. Variants of fuel elements placement with lower non-uniformity of energy release on fuel assemblies were selected as a result of calculations, and the influence of the number of fuel elements and their placement on reactivity was evaluated. It is shown that gadolinium fuel elements placement in the fourth ring is optimal from the point of view of non-uniformity of fuel energy release and burn-up depth. The influence of the fuel assembly layout on the fuel burnup depth for separate groups of fuel pins is considered. The variant of reduction of computational resources expenditures by means of allocation of the most different in energy release and burnup groups of gadolinium fuel rods is offered. Comparison of the investigated assemblies with the existing U49G6 type fuel assembly is carried out. A method to estimate the underproduction of thermal energy in the fuel assembly associated with the non-uniformity of fuel element burnup in it, while maintaining the maximum burnup depth for individ-

ual fuel elements at the level of existing samples is proposed. On the basis of the analysis of the value of underproduction, a variant of improving the configuration of fuel assemblies with six fuel elements is proposed to equalise the field of energy release and reduce unproductive fuel losses. Therefore, enrichment in the first, second and tenth rings of fuel elements, counting from the centre tube of the fuel assembly, can be reduced. As a result of such profiling, the burnup depth of the most burned-out fuel elements in the cassette can be reduced to 1.015 of the average for the fuel assembly.

Keywords: gadolinium fuel rod, fuel assembly, WWER-1000, reactivity, gadolinium, energy release, burnout, burnup, Serpent.

Введение

В конце топливной кампании в ядерном топливе реактора ВВЭР всегда имеется невыгоревшая часть топливных нуклидов, обусловленная неравномерностью поля энерговыделения в активной зоне. Чем выше эта доля, тем ниже эффективность и выше потенциал для оптимизации использования топлива. Основную часть выработки ядерной энергии сейчас обеспечивают тепловые реакторы, что означает повышенную потребность в использовании ископаемого урана-235, запасы которого ограничены. Так как переход к замкнутому топливному циклу в краткие сроки осуществить затруднительно, то важно сократить все возможные потери топлива.

Вторым аспектом, требующим ещё более равномерного поля энерговыделения в ТВС ядерных реакторов, является повышение их единичной мощности. В настоящее время реакторы ВВЭР-1000 массово прошли повышение мощности до 104%, но АО «Концерн Росэнергоатом» рассматривает и варианты повышения мощности до 107-110%. Так, при неизменном поле энерговыделения и конструкции топлива повышение мощности неизбежно приведёт к снижению запасов по предельным тепловым нагрузкам на твэлы, и таким образом снизит уровень теплотехнической надёжности активных зон.

Обеспечение равномерности поля энерговыделения является одной из главных задач, стоящих перед разработчиками ядерного топлива и топливных загрузок. Чтобы достичь необходимых результатов, в проектах рассматриваются различные варианты ТВС как с использованием выгорающего поглотителя, так и без него, но с разным обогащением по ^{235}U . В роли выгорающего поглотителя применяется Gd_2O_3 в отдельных топливных элементах – твэгах.

Проблема неравномерности поля энерговыделения рассматривалась в работах НИЯУ МИФИ [1-6], НТЦ ЯРБ [3], Курчатовского института [7, 8]. Изучались влияние профилирования по радиусу твэга с выгорающим поглотителем, влияние различных обогащений твэлов и концентраций Gd_2O_3 в твэгах. Особо стоит отметить, что неравномерность энерговыделения в ТВС влияет на характеристики безопасности при обращении с облучёнными ТВС, на радиационную безопасность контейнеров с ОЯТ [3, 4].

Разработчиками ядерного топлива предлагаются варианты ТВС с 6, 12, 18, 24 и 27 твэгами. Применение высокого количества выгорающего поглотителя способствует компенсации большего запаса реактивности [5], но провоцирует неравномерное энерговыделение и выгорание топлива внутри кассеты. Рассмотрим эту проблему на примере ТВС реактора ВВЭР-1000 с шестью твэгами. В качестве прототипа существующей кассеты этого типа может служить

модификация U49G6. Данная ТВС содержит шесть симметрично расположенных твэгов в восьмом гексагональном кольце в соответствии со схемой нумерации на рисунке 1.

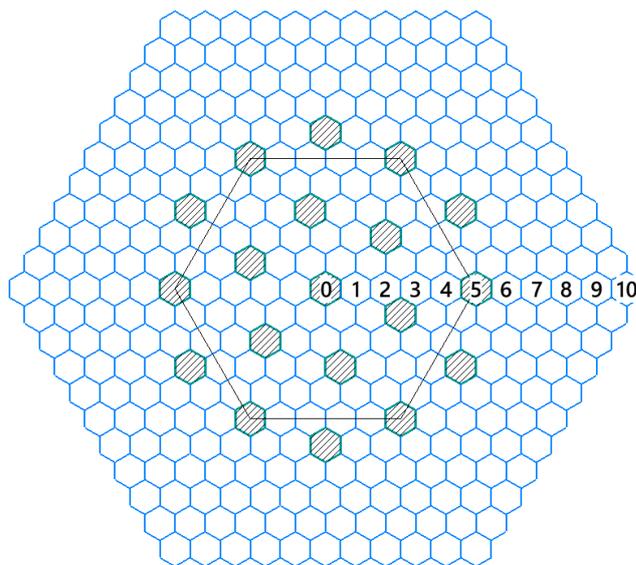


Рисунок 1. Нумерация гексагональных колец
Figure 1. Hexagonal ring numbering

Такая кассета включает 306 твэлов и 6 твэгов. Обогащение твэлов по урану-235 составляет 4,92%, твэгов – 3,6% с добавкой оксида гадолиния массовой долей 5,0%

Для оптимизации потвэльного распределения энерговыделения и глубины выгорания в данной работе необходимо:

- смоделировать решетку ТВС реактора ВВЭР-1000;
- установить зависимость между расположением твэгов в ТВС и их влиянием на степень неравномерности энерговыделения и глубины выгорания;
- оценить недовыработку энергии в ТВС, связанную с потвэльной неравномерностью, в зависимости от ее компоновки;
- предложить усовершенствованную компоновку ТВС, которая позволит минимизировать потвэльную неравномерность энерговыделения и выгорания топлива и недовыработку энергии.

Методы исследования

Моделирование внутрикассетных распределений энерговыделения и глубины выгорания ТВС проводилось с помощью нейтронно-физического кода Serpent [9], работа которого основана на методе Монте-Карло. Данный метод подразумевает моделирование случайных траекторий отдельных нейтронов. Это позволяет сократить до минимума количество приме-

няемых при расчёте приближений. Таким образом, метод Монте-Карло можно рассматривать как численный эксперимент, способный заменить эксперимент реальный. Основным недостатком является время, необходимое для получения результата, а также высокая потребность в вычислительных ресурсах.

Так как метод основан на случайных событиях, ему присуща статистическая погрешность. Для обеспечения точности получаемых результатов была проведена проверка сходимости.

Для исследования неравномерности энерговыделения была смоделирована бесконечная по высоте ТВС U49G6 с зеркальными граничными условиями, с использованием ядерных данных по библиотеке JEFF-3.1.1. Проверка сходимости по коэффициенту размножения ($K_{эф}$) показала, что результат с установившейся погрешностью на уровне 0,1% можно получить при 70000 нейтронных историй и 600 циклах (рис. 2). Планки погрешностей на рисунке 3 и последующих соответствуют трём стандартным отклонениям.

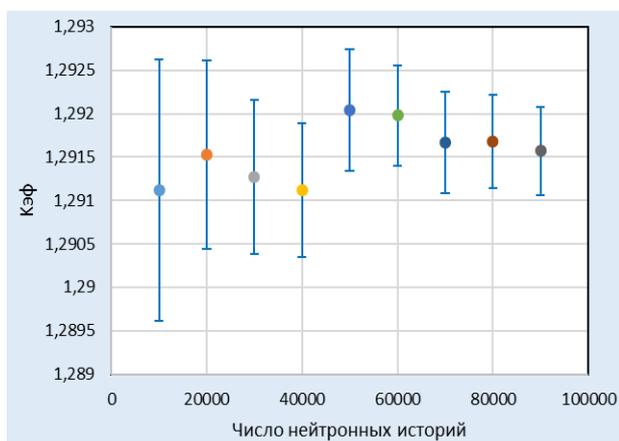


Рисунок 2. Проверка сходимости
Figure 2. Verification of convergence

При этом несимметричность между секторами ТВС по величине относительного энерговыделения в твэле $K_{ТВС}$ не превышает 0,01. Относительное энерговыделение в i -м твэле или твэге определялось по формуле (1):

$$K_{ТВС(i)} = \frac{Q_i}{\langle Q_i \rangle}, \quad (1)$$

где Q_i – мощность, выделяемая в i -м твэле;
 $\langle Q_i \rangle$ – мощность, выделяемая в «среднем» твэле.

Анализ неравномерности энерговыделения и глубины выгорания в ТВС

В ходе работы рассматривались варианты сборки с количеством твэгов 6, 12, 18 и 24. Помимо количества, также менялось расположение твэгов в гексагональных кольцах. Результаты расчетов оценивались с помощью диаграмм и графиков энерговыделения, которые строились для каждой сборки.

При размещении твэгов во втором гексагональном кольце центр ТВС будет обладать более слабым энерговыделением, чем периферия. Поэтому целесообразно размещать твэги, начиная с третьего гексагональ-

ного кольца. В этом случае энерговыделение ТВС станет более равномерным (табл. 1).

Таблица 1. Энерговыделения и $K_{эф}$ в разных вариантах расположения твэгов

Table 1. Energy Emissions and C_{ef} in different variants of gadolinium fuel rods arrangement

№ кольца	Мин. относительное энерговыделение	Макс. относительное энерговыделение	$K_{эф}$
2	0.83	1.10	1.3594
3	0.92	1.10	1.3552
4	0.93	1.10	1.3540
6	0.89	1.10	1.3556
7	0.89	1.11	1.3583
8	0.89	1.12	1.3584
9	0.88	1.12	1.3588
10	0.87	1.11	1.3651
2 и 3	0.78	1.14	1.3115
3 и 4	0.85	1.14	1.3041
3 и 6	0.93	1.14	1.2917
3 и 7	0.94	1.12	1.2924
3 и 8	0.93	1.10	1.2919
3 и 9	0.93	1.10	1.2917
3 и 10	0.92	1.10	1.2978
2, 6 и 9	0.91	1.14	1.2336
3, 6 и 9	0.93	1.13	1.2311
4, 6 и 9	0.93	1.16	1.2332
2, 6, 9 и 10	0.96	1.15	1.1769
3, 6, 9 и 10	0.96	1.15	1.1742
3, 6, 8 и 9	0.96	1.14	1.1727
4, 6, 8 и 9	0.95	1.21	1.1756

Данные результаты приведены на графике (рис. 3).

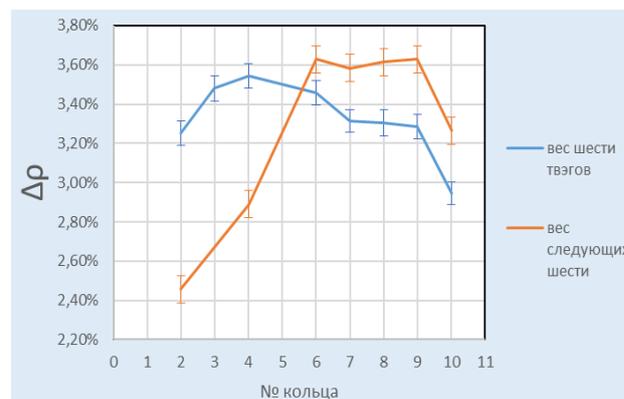


Рисунок 3. Эффективность шести твэгов в различных кольцах ТВС

Figure 3. Efficiency of six gadolinium fuel rods in different fuel assembly rings

На графике приведена эффективность (в единицах реактивности) группы из шести твэгов в случаях:

- ТВС с шестью твэгами;
- ТВС с 12 твэгами при условии, что первые шесть твэгов уже установлены в 3-м кольце.

Наличие в одном секторе двух твэгов в соседних кольцах снижает эффективность компенсации запаса реактивности. Твэг максимально эффективно выполняет свою задачу, когда он располагается в центре

сектора. Равная удалённость твэгов друг от друга позволяет нейтронам со всей ТВС с одинаковой вероятностью поглощаться именно в твэге.

По коэффициентам неравномерности энерговыделения и влияния твэгов на реактивность были отобраны две конфигурации ТВС: одна с шестью твэгами в 4-м кольце и одна с двенадцатью твэгами в 3-м и 7-м кольцах. Данные сборки обладают наиболее равномерным энерговыделением по сравнению с остальными рассмотренными сборками.

Выводы, сделанные выше, носят отпечаток принятых допущений: так, зеркальные граничные условия подразумевают, что свежая ТВС окружена другими такими же свежими ТВС. Исходя из картограмм загрузки ВВЭР-1000, это не полностью так. Но в противном случае сделанные выводы не носили бы общего характера, а касались бы только ТВС в определённой позиции в активной зоне.

Для определения зависимости глубины выгорания от расположения была выбрана сборка с шестью твэгами: в варианте U49G6 и в предложенном варианте с твэгами в 4-м кольце. Так как при расчетах в Serpent параметры твэлов были заданы одним материалом, и программа усредняла глубину выгорания по всей сборке, то было принято решение условно разделить твэлы на группы, не меняя при этом их параметры. Разделение проводилось следующим образом: твэлы на последнем кольце, на первом кольце, вокруг твэгов и все остальные.

Чтобы наглядно показать, как компоновка ТВС влияет на глубину выгорания, стоит ввести понятие неравномерности выгорания. Неравномерность выгорания представляет собой отношение глубины выгорания в определенном материале к средней глубине выгорания. Таким образом, была проведена серия расчетов с изменением расположения твэгов (рис. 4-6).

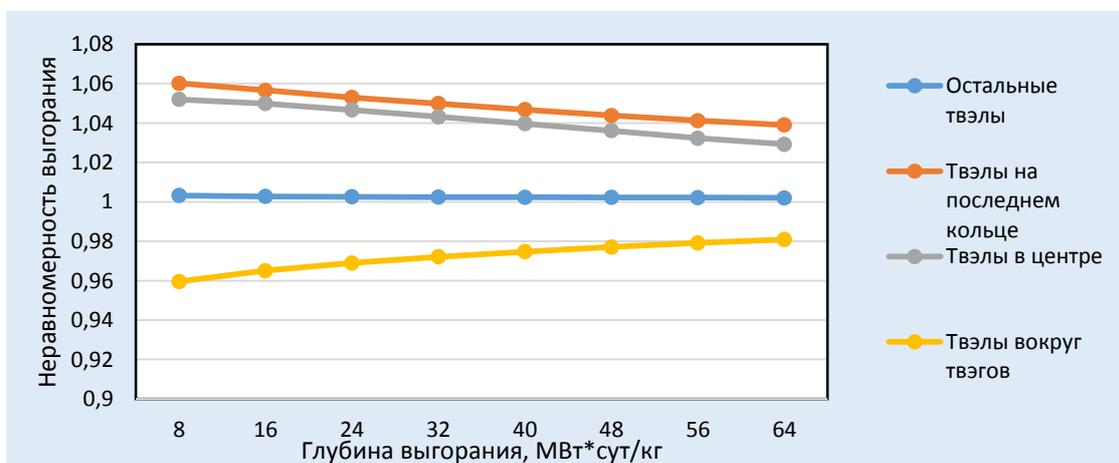


Рисунок 4. Неравномерность выгорания при твэгах в 4-м кольце
Figure 4. Unevenness of burnout at gadolinium fuel rods in the 4th ring

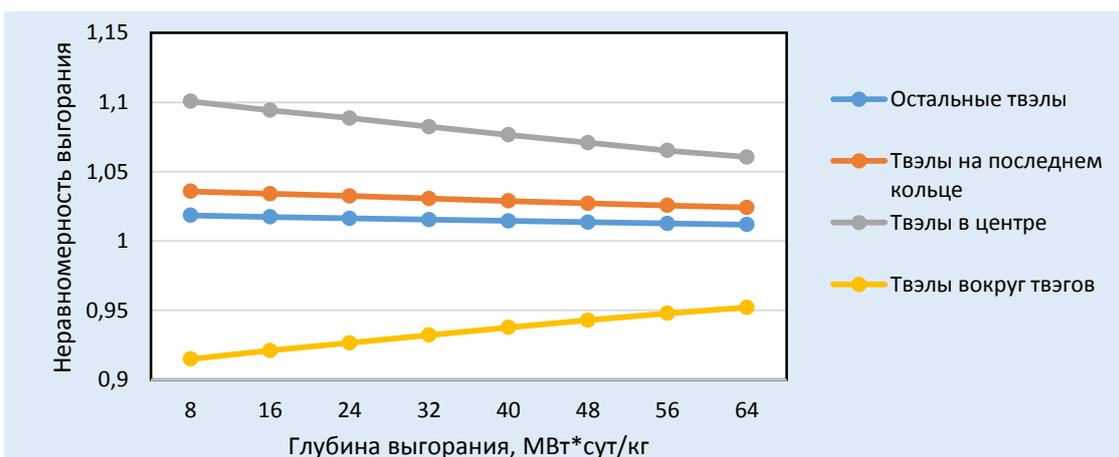


Рисунок 5. Неравномерность выгорания при твэгах в 7-м кольце
Figure 5. Unevenness of burnout at gadolinium fuel rods in the 7th ring

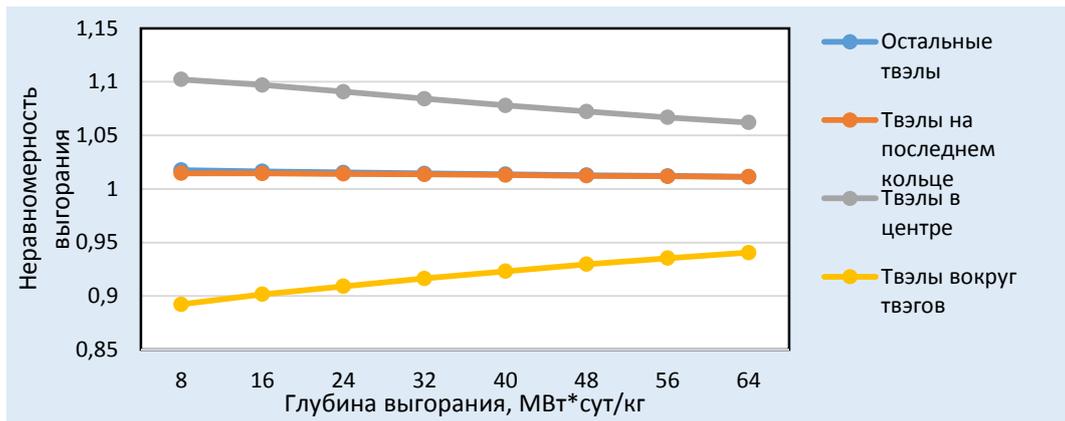


Рисунок 6. Неравномерность выгорания при твэгах в 10-м кольце
 Figure 6. Unevenness of burnout at gadolinium fuel rods in the 10th ring

По результатам, представленным на графиках, видно, что в случаях расположения твэгов в средних кольцах ТВС наблюдается меньшая неравномерность выгорания в сравнении с другими вариантами расположения. Таким образом, неравномерность энергос-

деления и выгорания имеют одинаковую зависимость от компоновки ТВС (рис. 7).

В настоящее время в загрузках ВВЭР-1000 применяются ТВС типа U49G6, где твэги располагаются в восьмом кольце (рис. 8).

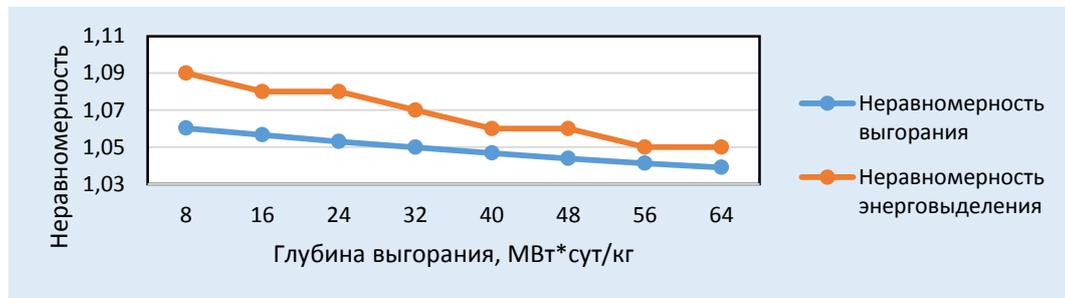


Рисунок 7. Неравномерности при расположении твэгов во 4-м кольце
 Figure 7. Irregularities in the positioning of gadolinium fuel rods in the 4th ring

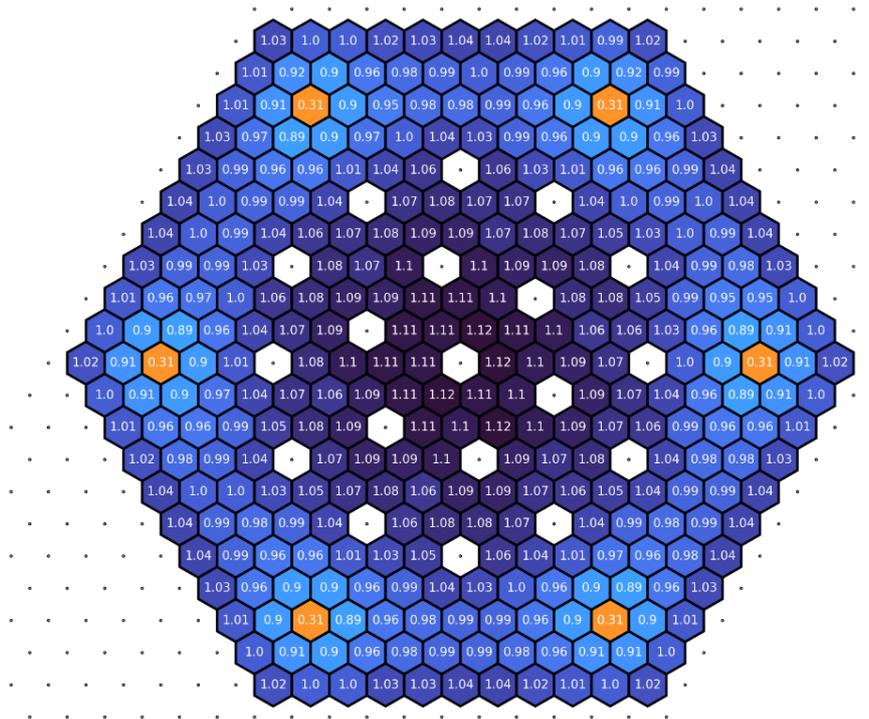


Рисунок 8. Потвэльное энерговыделение в ТВС типа U49G6
 Figure 8. Potential energy release in U49G6 type fuel assemblies

Данная сборка рассматривалась в качестве эталона, с которым можно сравнивать результаты расчетов сборок, используемых в работе. Поскольку такие кассеты применяются, и ядерная безопасность их применения обоснована, то снижение неравномерности энерговыделения и выгорания приведёт либо к дополнительной выработке тепловой энергии кассетой, либо к увеличению запасов до теплотехнической надёжности и прочности твэлов. Для оценки недовыработки в ТВС использовалась формула (2):

$$\Delta B = \sum_i (B_{max} - B_i) \cdot n, \quad (2)$$

где n – количество твэлов в i -й группе,

B_i – глубина выгорания твэлов i -й группы;

B_{max} – глубина выгорания в группе наиболее выгоревших твэлов.

Результаты расчетов при средней по ТВС глубине выгорания 64 МВт·сут/кг представлены в таблице 2.

Лучшим образом, в сравнении с эталонной сборкой, себя показала ТВС с твэгами в четвертом кольце (рис. 9), поэтому она будет использоваться для дальнейшего исследования.

Таблица 2. Влияние компоновки ТВС на глубину выгорания и недовыработку

Table 2. Effect of fuel assembly layout on burn-up depth and underproduction

Расположение твэгов	Недовыработка в ТВС, МВт*сут/кг	Максимальная глубина выгорания, МВт*сут/кг	Минимальная глубина выгорания, МВт*сут/кг
ТВС без твэгов	686.982	66.2029	63.7569
2 кольцо	633.588	66.5911	58.5090
3 кольцо	647.251	66.6206	62.0657
4 кольцо	613.002	66.4973	62.7743
6 кольцо	941.955	67.5784	61.4411
7 кольцо	1043.767	67.8665	60.9249
8 кольцо (U49G6)	1091.639	68.1526	60.6327
9 кольцо	1102.109	68.1076	60.8108
10 кольцо	1081.551	67.9694	60.1965

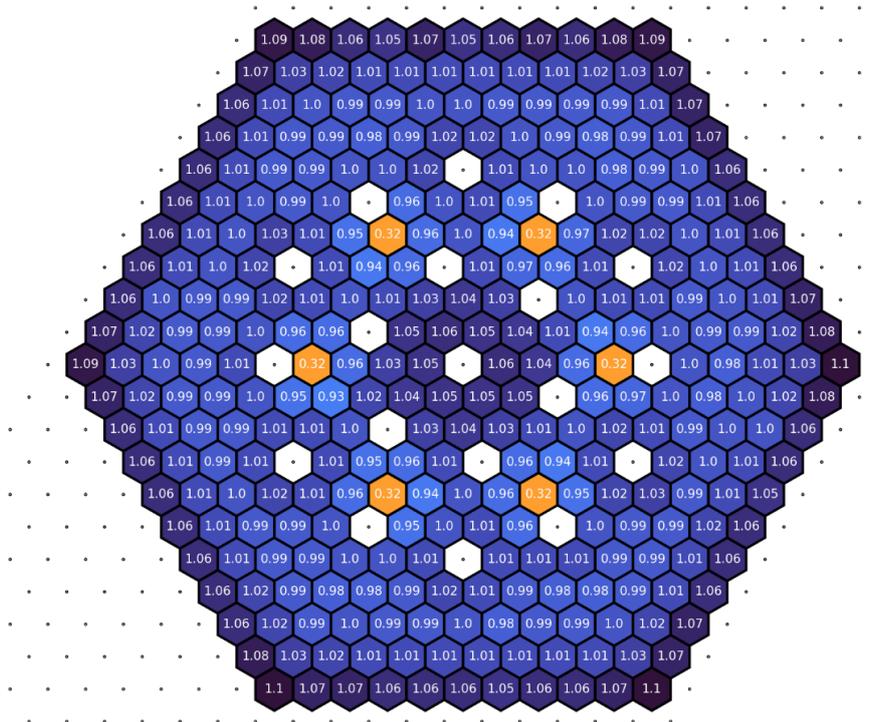


Рисунок 9. Потенциальное энерговыделение в ТВС с твэгами в 4-м кольце

Figure 9. Potential energy release in fuel assemblies with gadolinium fuel rods in the 4th ring

Проверим, есть ли необходимость в разбиении твэлов на большее количество групп, например, по кольцам. При перерасчете ТВС с твэгами в четвертом кольце для данного случая были получены результаты, приведенные в таблице 3. Посчитанная по формуле (2) недовыработка составила 617,5 МВт*сут/кг, что мало отличается от результатов, полученных в случае

разбиения твэлов на 4 группы (613, МВт*сут/кг). Разбиение на большее число групп является более точным, но в то же время требует использовать при расчете методом Монте-Карло больше оперативной памяти. Поэтому, если нет необходимости изменять обогащение отдельных твэлов, исследование можно проводить и с меньшим числом групп.

Таблица 3. Глубина выгорания в различных группах твэлов

Table 3. Burn-up depth in different fuel element groups

№ кольца	Глубина выгорания, МВт*сут/кг							
	1	8.4239	16.821	25.161	33.443	41.640	49.789	57.894
2	8.2822	16.564	24.816	33.031	41.186	49.303	57.383	65.431
3	7.9355	15.917	23.906	31.909	39.902	47.900	55.889	63.881
4	7.7675	15.606	23.475	31.368	39.282	47.216	55.169	63.115
5	7.8901	15.825	23.786	31.754	39.727	47.700	55.702	63.684
6	8.0453	16.094	24.141	32.183	40.223	48.262	56.296	64.322
7	7.9667	15.925	23.885	31.850	39.830	47.810	55.791	63.783
8	7.9231	15.835	23.752	31.688	39.639	47.609	55.581	63.558
9	8.0706	16.114	24.157	32.193	40.233	48.265	56.293	64.323
10	8.4796	16.902	25.278	33.605	41.886	50.126	58.331	66.513
ТВЭГи	3.0587	6.6185	10.591	14.970	19.755	24.938	30.524	36.475

Предложения по усовершенствованию компоновки ТВС

Для снижения неравномерности выгорания рассмотрен ряд вариантов с внутрикассетным профилированием обогащения ядерного топлива. Было принято решение снижать обогащение в отдельных твэлах. В разных вариантах ТВС обогащение менялось по кольцам. Сборкой, в которой удалось добиться заметного снижения недовыработки и неравномерности,

была ТВС с понижением обогащения в твэлах первого, второго и десятого колец. При этом, общее количество урана-235 в кассете было сохранено, недостаток обогащения был равномерно распределён между остальными твэлами. Обогащение первого и десятого колец было снижено на 0,3%, второго на 0,1%. Результаты расчёта глубины выгорания по кольцам ТВС с предлагаемой схемой профилирования приведены в таблице 4.

Таблица 4. Глубина выгорания в различных группах твэлов с уменьшенным обогащением в 10-м кольце

Table 4. Burn-up depth in different groups of fuel elements with reduced enrichment in the 10th ring

№ кольца	Глубина выгорания, МВт*сут/кг							
	1	8.4599	16.890	25.265	33.580	41.823	49.994	58.125
2	8.3075	16.608	24.897	33.128	41.327	49.476	57.604	65.688
3	7.9501	15.942	23.959	32.001	40.029	48.074	56.113	64.137
4	7.7974	15.665	23.566	31.496	39.450	47.419	55.391	63.369
5	7.9233	15.897	23.892	31.896	39.918	47.940	55.965	63.994
6	8.0981	16.196	24.297	32.390	40.471	48.545	56.606	64.664
7	8.0272	16.037	24.052	32.070	40.087	48.111	56.134	64.153
8	8.0006	15.989	23.977	31.972	39.978	47.984	55.991	63.992
9	8.1992	16.346	24.465	32.574	40.671	48.747	56.806	64.850
10	8.1984	16.372	24.514	32.626	40.709	48.781	56.847	64.911
ТВЭГи	3.0666	6.6398	10.639	15.037	19.856	25.073	30.690	36.682

Полученная компоновка ТВС имеет недовыработку равную 1,02 МВт*сут/кг при общей выработке 34486,38 МВт*сут. Коэффициент неравномерности энерговыделения в начале и в конце кампании равен 1,06 и 1,04 соответственно, а коэффициент неравномерности по выгоранию составил 1,015. Максимальное выгорание снизилось до 64,97 МВт*сут/кг при среднем значении 64,0 МВт*сут/кг. В этом случае недовыработка составила 462 МВт*сут на одну ТВС, что меньше недовыработки и в исходном варианте U49G6, и в предложенном варианте с твэгами в четвёртом кольце.

Кроме того, на графике энерговыделения для непрофилированной ТВС (см. рис. 9) есть заметные пи-

ки энерговыделения в угловых твэлах. В случае с уменьшением обогащения в том же кольце данные пики снизились с 1,10 до 1,06 в относительных величинах (рис. 10).

Выводы

В работе построена и проанализирована модель ТВС ВВЭР-1000 для расчета потвэльного распределения энерговыделения и глубины выгорания методом Монте-Карло. Рост количества выгорающих материалов слабо влияет на точность результатов, но при этом требует больше вычислительных ресурсов.

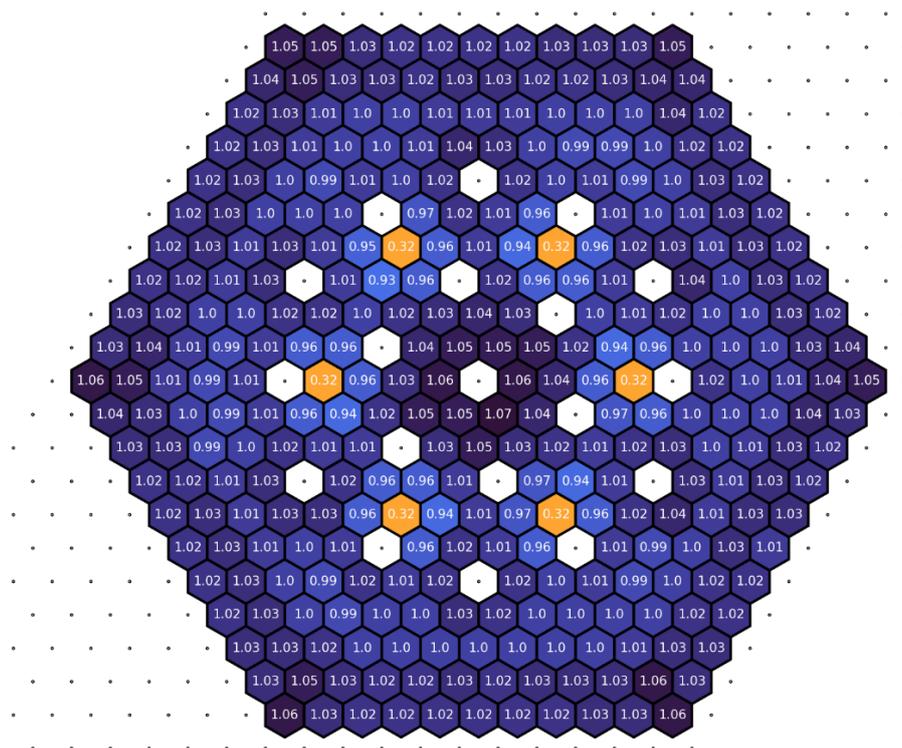


Рисунок 10. Потвэльное энерговыделение в ТВС с твэгами в 4-м кольце и с понижением обогащения в твэлах 10-го кольца

Figure 10. Potential energy release in fuel assemblies with gadolinium fuel rods in the 4th ring and with decreasing enrichment in fuel elements of the 10th ring

Расположение твэгов в ТВС оказывает заметное влияние на распределение поля энерговыделения и глубины выгорания в ТВС реактора ВВЭР-1000. На примере множества кассет с шестью твэгами установлено, что расположение твэгов в 4-м кольце показывает лучшие результаты по неравномерности энерговыделения.

Для оценки экономического ущерба от неравномерности энерговыделения в ТВС можно определить недовыработку энергии с помощью формулы (2). ТВС с твэгами в 4-м кольце показала меньшую недовыработку в сравнении с прочими вариантами кассет с шестью твэгами.

Дальнейшего снижения неравномерности выгорания топлива в ТВС возможно добиться применением

профилирования – выделения групп твэлов различного обогащения. Многовариантные расчёты позволили предложить усовершенствованную компоновку ТВС, позволяющую уменьшить потвэльную неравномерность энерговыделения и выгорания топлива в сравнении с используемой в топливных загрузках ВВЭР-1000 ТВС типа U49G6. Для этого следует снизить обогащение в первом, втором и десятом гексагональных кольцах, считая от центральной трубы. Дополнительная выработка при этом при условии оптимального проектирования топливной загрузки составит до 462 МВт·сут с одной усовершенствованной кассеты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Внуков Р.А., Жаворонкова И.А., Колесов В.В., Карпович Г.В. Подходы к оптимизации глубины выгорания с помощью радиального профилирования твэга. *Ученые записки физического факультета московского университета*. 2021;1:2110303. Режим доступа: <http://uzmu.phys.msu.ru/file/2021/1/2110303.pdf> (дата обращения: 29.08.2023).
2. Внуков Р.А., Колесов В.В., Жаворонкова И.А., Котов И.А., Праманик М.Р. Влияние выгорающего поглотителя на нейтронно-физические характеристики тепловыделяющей сборки ВВЭР-1200. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2021;(2):27–37. <https://doi.org/10.26583/npe.2021.2.03>
3. Соболев А.В., Каражелевская Ю.Е., Зубков А.А. Анализ неравномерности высотной глубины выгорания топлива в сборках ВВЭР-1000 при работе на низких уровнях мощности. *Ядерная и радиационная безопасность*. 2019;2(92):10–16. EDN HLBFB0 <https://doi.org/10.26277/SECNRS.2019.92.2.002>
4. Внуков В.С., Куликов В.И., Чкуасели Л.И. Влияние аксиального распределения глубины выгорания ОТВС на значение $K_{эфф}$ контейнеров с отработавшим ядерным топливом. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2015;2:108–116. <https://doi.org/10.26583/npe.2015.2.11>
5. Абу Сондос М.А. Демин В.М., Савандер В.И. Сравнение влияния выгорающих поглотителей (Gd и Eu) на нейтронно-физические характеристики ТВС реакторов ВВЭР-1000. *Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»*. 2019;8(3):199–205. EDN WBOFAI. <https://doi.org/10.1134/S2304487X19030027>

6. Музафаров А.Р., Савандер В.И. Использование выгорающих поглотителей в реакторах типа ВВЭР для снижения доли запаса реактивности, компенсируемого жидкостной системой при удлинённых кампаниях. *Глобальная ядерная безопасность*. 2022;(2):42-55. <https://doi.org/10.26583/gns-2022-02-05>

7. Бергельсон Б.Р. [и др.] Глубина выгорания ядерного топлива ВВЭР с разными поглотителями. *Атомная энергия*. 2010;109(4):240–245. Режим доступа: http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t109-4_2010/go.14/ (дата обращения: 29.08.2023).

8. Бикеев А.С., Дайченкова Ю.С., Калугин М.А., Шкаровский Д.А. Оптимизация параметров расчётной схемы при моделировании выгорания активной зоны ВВЭР-1000 по прецизионной программе MCU. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*. 2018;4:5–14. Режим доступа: URL: <https://vant.ippe.ru/year2018/4/neutron-constants/1559-1.html> (дата обращения: 30.09.2023).

9. Leppänen J, Pusa M., Viitanen T., Valtavirta V., Kaltiaisenaho T. The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013. *Annals of Nuclear Energy*. 2014;82:06021 <https://doi.org/10.1051/snanc/201406021>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Лапкис А.А. – постановка задач, определение методики исследования;

Старченко А.С. – выполнение расчётов.

Тришечкин Д.В. – литературный обзор, анализ достоверности и сходимости результатов

Попова И.Ю. – анализ и визуализация результатов

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без дополнительных источников финансирования

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Александр Аркадьевич Лапкис, к.т.н., доцент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»; ведущий инструктор учебно-тренировочного подразделения, Ростовская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9431-7046>

e-mail: AALapkis@mephi.ru

Александр Сергеевич Старченко, 5 курс 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг», Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8797-5831>

e-mail: shura.star2001@mail.ru

Дмитрий Витальевич Тришечкин, 5 курс 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг», Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7402-7224>

e-mail: shuh.red@yandex.ru

Ирина Юрьевна Попова, к.б.н., доцент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: YPopova@mephi.ru

Поступила в редакцию 17.10.2023

После доработки 21.11.2023

Принята к публикации 23.11.2023

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Lapkis A.A. – setting the objectives, defining the research methodology;

Starchenko A.S. – making calculations;

Trishechkin D.V. – literature review, analysis of reliability and convergence of results;

Popova I.Yu. – analysing and visualising results.

FUNDING:

No additional funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Aleksandr A. Lapkis, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Atomic Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»; Senior Instructor of the Training Department, Rostov Nuclear Power Plant – branch of Rosenergoatom Concern JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9431-7046>

e-mail: AALapkis@mephi.ru

Aleksandr S. Starchenko, 5th-year student of «Nuclear Power Plants: Design, Operation and Engineering» Department, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8797-5831>

e-mail: shura.star2001@mail.ru

Dmitry V. Trishechkin, 5th-year student of «Nuclear Power Plants: Design, Operation and Engineering» Department, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7402-7224>

e-mail: shuh.red@yandex.ru

Irina Yu. Popova, Cand. Sci. (Bio.), Associate Professor, Department of Atomic Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: YPopova@mephi.ru

Received 17.10.2023

Revision 21.11.2023

Accepted 23.11.2023

КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ И
СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
SAFETY CULTURE AND SOCIO-ECONOMIC ASPECTS
DEVELOPMENT OF PLACEMENT TERRITORIES
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 331.453

<https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-08>

EDN WUVYUP



Развитие культуры безопасности на промышленном предприятии
(на примере Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск)

Т.С. Попова¹  , В.А. Руденко¹ , А.А. Попов² , В.А. Бондаренко³ ,
Ю.А. Евдошкина¹ 

¹Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Россия

²Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», г. Волгодонск, Ростовская обл., Россия

³Ростовский государственный экономический университет (РИНХ), г. Ростов-на-Дону, Россия

 TSPopova@mephi.ru

Аннотация. В качестве объекта исследования в статье выбран Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, который является поставщиком комплексных решений, включающих инжиниринг, проектирование, изготовление, поставку, монтаж и сервис энергетического оборудования для объектов использования атомной энергии, тепловых электростанций, а также для предприятий газовой и нефтехимической промышленности. Предметной областью выбрана культура безопасности (КБ), которую предприятие реализует в целях исполнения стратегии Госкорпорация «Росатом» по достижению технологического лидерства и суверенитета в глобальном масштабе. Цель исследования – на основе анализа существующих теорий и практик управления культурой безопасности выявить основные характеристики данного явления и соотнести их с особенностями процесса внедрения КБ в Филиале АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск. В качестве основных методов при написании статьи выступили теоретический анализ научной литературы по проблематике исследования, графический метод, анализ статистических данных, ретроспективный анализ и изучение локальных актов объекта исследования в части обеспечения КБ. Основным результатом исследования выступает вывод о том, что КБ Филиала, как и его организационная культура, относится к коллективным ценностям и убеждениям. Формирование и поддержание на высоком уровне КБ достигается с помощью установления приоритета безопасности над экономическими и производственными целями; обеспечения понимания каждым работником влияния его деятельности на безопасность и последствий, к которым может привести несоблюдение или некачественное выполнение требований КБ; обеспечения понимания каждым руководителем и работником недопустимости сокрытия ошибок в своей деятельности, необходимости выявления и устранения причин их возникновения, необходимости постоянного самосовершенствования, изучения и внедрения передового опыта и т.д.

Ключевые слова: культура безопасности, Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, корпоративная культура, качество технологических процессов, производственная безопасность, кривая безопасности Брэдли, организация труда, травматизм.

Для цитирования: Попова Т.С., Руденко В.А., Попов А.А., Бондаренко В.А., Евдошкина Ю.А. Развитие культуры безопасности на промышленном предприятии (на примере Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск). *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(4):60–70. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-08>

For citation: Popova T.S., Rudenko V.A., Popov A.A., Bondarenko V.A., Evdoshkina Yu.A. Safety culture development at an industrial enterprise (on the example of «Atomash» Branch of «AEM-Technologies» JSC in Volgogradsk). *Global nuclear safety*. 2023;13(4):60–70 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-08>

Safety culture development at an industrial enterprise
(on the example of «Atomash» Branch of «AEM-Technologies» JSC in Volgogradsk)

Tatyna S. Popova¹  , Valentina A. Rudenko¹ , Andrey A. Popov² ,
Viktoriy A. Bondarenko³ , Yuliya A. Evdoshkina¹ 

¹Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgogradsk, Rostov region, Russia

²«Atomash» the branch of «AEM-technologies» JSC, Volgogradsk, Rostov region, Russia

³Rostov State University of Economics (RSUE), Rostov-on-Don, Russia

 TSPopova@mephi.ru

Abstract. The article chooses Atommash Branch of AEM-Technologies JSC in Volgodonsk as the object of study, which is a supplier of integrated solutions including engineering, design, manufacturing, supply, installation and service of power equipment for nuclear power facilities, thermal power plants, as well as for enterprises of the gas and petrochemical industries. The subject area chosen is safety culture (SC), which the enterprise implements in order to fulfil the strategy of ROSATOM to achieve technological leadership and sovereignty on a global scale. The purpose of the study is to identify the main characteristics of this phenomenon based on the analysis of existing theories and practices of safety culture management and to correlate them with the specifics of the process of implementing the safety culture at the Atommash the branch of JSC AEM-Technologies in Volgodonsk. The theoretical analysis of scientific literature on the research problem, graphical method, statistical data analysis, retrospective analysis and study of local acts of the research object in terms of safety culture provision are the main methods used in writing the paper. The main result of the research is the conclusion that safety culture of the branch as well as its organisational culture, refers to collective values and beliefs. Formation and maintenance of high level of safety culture is achieved by prioritising safety over economic and production goals, ensuring that each employee understands the impact of their activities on safety and the consequences that may result from non-compliance or poor performance of safety culture requirements; ensuring that each manager and employee understands the inadmissibility of concealing errors in their activities, the need to identify and eliminate the causes of their occurrence, the need for continuous self-improvement, изучения и внедрения передового опыта.

Keywords: safety culture, Atommash Branch of AEM-Technologies JSC in Volgodonsk, corporate culture, quality of technological processes, industrial safety, Bradley safety curve, labour organization, injury rate, Russian Science Citation Index.

Введение

Культура безопасности – важная тема, требующая больших временных ресурсов для внедрения и восприятия; это такая сложившаяся в организации атмосфера, при которой абсолютно все работники, независимо от направления деятельности, вовлечены в вопросы обеспечения безопасности, а нарушения требований безопасности воспринимаются работниками как недопустимое событие. Изначально определение понятия «культура безопасности», как психологической и профессиональной подготовки сотрудников к работе с опасными веществами, целью которой является

обеспечение безопасности не только для себя, но и для всех сотрудников, было сформулировано в 1986 г. экспертами МАГАТЭ в заключении о причинах и результатах аварии на Чернобыльской АЭС. Было признано что, авария явилась следствием маловероятного совпадения ряда нарушений правил и регламентов эксплуатационным персоналом, что являлось свидетельством ненадлежащей культуры безопасности. Основные характеристики культуры безопасности, используемые Группой МАГАТЭ, представлены на рисунке 1.



Рисунок 1. Характеристики культуры безопасности, используемые Группой МАГАТЭ
Figure 1. Safety Culture Characteristics used by the IAEA Group

Перечисленные ключевые характеристики культуры безопасности, предложенные МАГАТЭ, актуальны по сей день и коррелируют как с позицией многих ученых-теоретиков, так и с позицией практиков – представителей энергетических предприятий, отвечающих за данный вопрос. Со времени первого упоминания о феномене культуры безопасности, как основополагающего фактора производственной деятельности предприятий энергетического комплекса, достаточно многие авторы стали рассматривать ее в качестве объекта исследования. В статье изучены ра-

боты С.П. Аксиненко, А.М. Карякина, Ю.Н. Селезнева [1], Е.А. Масловой, Т.П. Бажиной [2], В.С. Добровольского, В.Ю. Радоуцкого [3], И.И. Васильевой [4], Е.А. Муштониной, Е.А. Кузнецовой, Е.В. Ниловой, В.С. Хомяковой [5], Е.Л. Мальгина, А.М. Букринского [6], Эрдмана Н.Д. [7], Руденко В.А., Василенко Н.П. [8], Ю.А. Евдошкина [9], Т.С. Степченко [10] и многих других. Некоторые из позиций перечисленных авторов относительно содержания и особенностей категории КБ представлены на рисунке 2.

Аксиненко С.П., Карякин А.М., Селезнев Ю.Н.

- КБ - приверженность постоянному и систематическому поддержанию безопасности и личной ответственности всех лиц, связанных с деятельностью предприятия.

Маслова Е.А., Бажина Т.П.

- КБ определяется тем, насколько эффективно реализуются задачи надзора, аудита, проверок, мониторинга и оценки процесса обеспечения безопасности как самим объектом, так и внешними организациями, включая регулирующие органы, с целью своевременного выявления отклонений, коррекции и совершенствования процесса и его видов деятельности

Добровольский В.С., Радоуцкий В.Ю.

- КБ - состояние развития человека, социальной группы, общества, характеризуемое отношением к вопросам обеспечения безопасной жизни и трудовой деятельности и, главное, активной практической деятельностью по снижению уровня опасности

Васильева И.И.

- КБ определяется как последовательно проводимый руководителем организации принцип приоритета безопасности во всех без исключения ситуациях конфликта интересов.

Муштонина Е.А., Кузнецова Е.А., Сорокина Е.А.

- КБ - это характеристики и особенности деятельности организации и поведения отдельных лиц, которые устанавливают, что безопасность обладает высшим приоритетом и ей уделяется внимание, определяемое ее значимостью, это ежедневный осознанный выбор каждого в пользу соблюдения требований безопасности движения и охраны труда

Нилова Е.В., Хомякова В.С.

- КБ определяется общим культурным и профессиональным уровнем поведения, компетентностью, отношением к выполняемой работе. Понятие «культура безопасности труда» является интегрированным и связывает общие понятия «культура безопасности» и «трудовая деятельность».

Букринский А.М.

- КБ - часть общей организационной культуры, положениями которой следует руководствоваться для эффективной реализации на практике культуры безопасности.

Мальгин Е.Л., Шеметова Е.Г., Эрдман Н.Д.

- КБ - это состояние развития человека, социальной группы, общества, характеризуемое отношением к вопросам обеспечения безопасной жизни и трудовой деятельности и, главное, активной практической деятельностью по снижению уровня опасности.

Руденко В.А., Василенко Н.П.

- КБ осуществляет регулирующую функцию в обеспечении требований безопасности при выполнении процессов, связанных с рисками: определение целей и приоритетов, распределение ресурсов, выбор и контроль решений, действий, достигнутых результатов.

Рисунок 2. Содержание культуры безопасности с позиции разных авторов
Figure 2. The content of safety culture from the position of different authors

Если рассмотреть динамику уровня публикационной активности авторов в российской научной электронной библиотеке, интегрированной с РИНЦ, то можно увидеть значительный прирост числа научных статей на тематику культуры безопасности за послед-

ние 10 лет (табл. 1). Очевидно, что за рассматриваемый период значительно возрос интерес научной общественности к проблемам культуры безопасности и различным аспектам управления ею в условиях современных вызовов и угроз.

Таблица 1. Анализ публикационной активности авторов по вопросам КБ (по данным eLibrary.ru)

Table 1. Analysis of authors' publication activity on safety culture issues (according to eLibrary.ru)

Период	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Количество публикаций	98	113	194	222	282	313	548	377	391	445	461
Абсолютный прирост	-	15	81	28	60	31	235	-171	14	54	16
Цепной индекс	-	1,153	1,717	1,144	1,270	1,110	1,751	0,688	1,037	1,138	1,036

Расчет цепного индекса демонстрирует прирост анализируемого показателя из года в год. Так, с 2012 по 2022 гг. количество статей по проблематике исследования возросло на 363 единицы (98 статей в 2012 г. и 461 статья в 2022 г.). Относительный прирост соста-

вил 370,4% ($363/98 \cdot 100$). Для проверки устойчивости тенденции была построена линия регрессии, которая подтвердила гипотезу о стабильном повышении интереса к культуре безопасности (рис. 3).

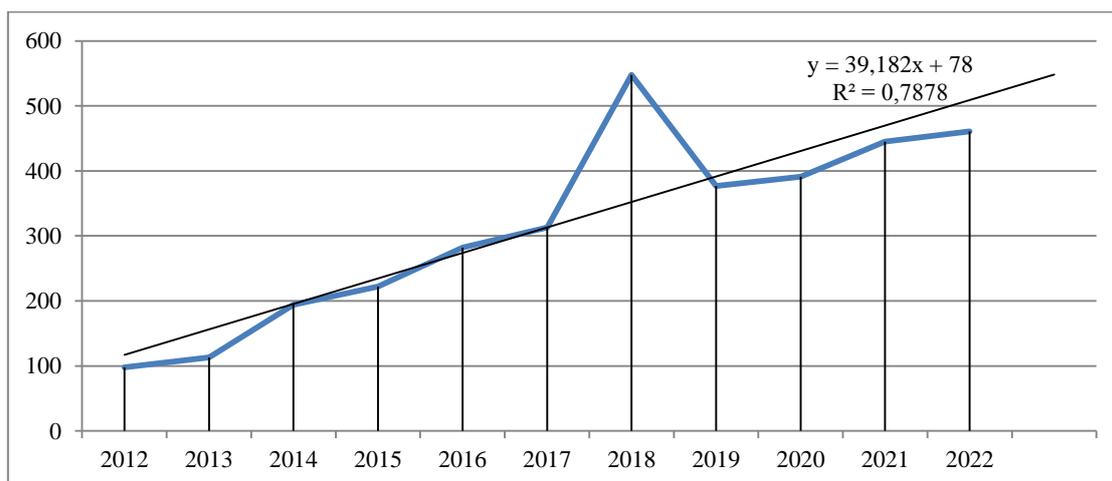


Рисунок 3. Динамика числа публикаций по аспектам КБ за 2012-2022 гг.

Figure 3. Dynamics of publications on safety culture aspects for 2012-2022.

Если отойти от научных интересов в сторону практической реализации принципов культуры безопасности, то показателем эффективности их применения можно считать данные о динамике показателей

производственного травматизма в РФ, собранные Единой общероссийской справочно-информационной системой по охране труда, предоставленные Минтрудом, ФСС, Росстатом (табл. 2, рис. 4).

Таблица 2. Динамика показателей производственного травматизма в Российской Федерации

Table 2. Dynamics of industrial injuries in the Russian Federation

Показатели	Период										
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Среднесписочная численность работающих, млн. чел.	57,8	57,4	56,4	55,8	52,0	51,2	50,6	49,9	48,8	49,1	
Производственный травматизм со смертельным исходом	2999	2757	2347	2089	2072	1722	1698	1613	1476	1655	
Количество выявленных сокрытых несчастных случаев	1321	1090	953	775	726	696	565	595	592	472	
Количество групповых несчастных случаев на производстве	901	813	654	554	489	421	409	368	361	347	
Занятые во вредных условиях труда в % к общей численности занятых	31,8	32,2	39,7	39,1	38,5	37,9	37,9	38,3	37,2	36,4	
Численность пострадавших (застрахованных) в связи со страховыми случаями по профзаболеваниям	5229	5789	7268	6963	6209	5049	4598	4041	3494	4018	
Финансовое обеспечение предупредительных мер по сокращению производственного травматизма и профессиональных заболеваний работников, млн. рублей	6332,5	7648,7	8862,9	9527,9	10104,4	10578,7	10979,4	14468,9	17057,9	17175,8	

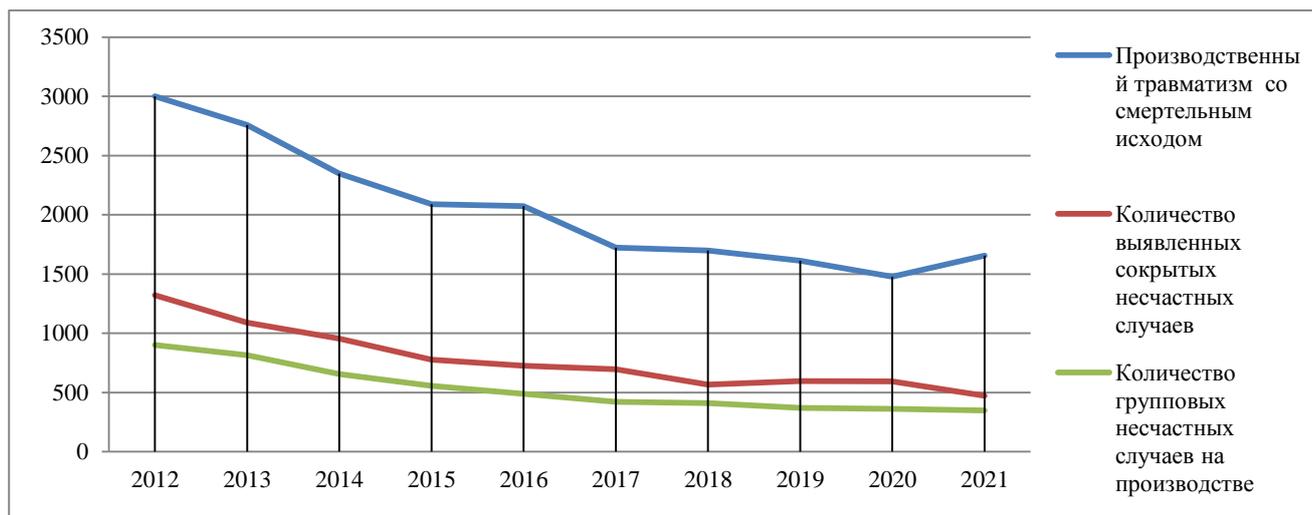


Рисунок 4. Динамика производственного травматизма в РФ за 2012-2022 гг.
Figure 4. Dynamics of industrial injuries in the Russian Federation for 2012-2022

Исходя из данных, представленных на рисунке и в таблице, можно сделать вывод, что в РФ за анализируемый период (с 2012 по 2021 гг.) заметно сократились случаи производственного травматизма со смертельным исходом, снизилось количество выявленных скрытых несчастных случаев и групповых несчастных случаев на производстве, стала значительно меньше численность пострадавших в связи со страховыми случаями по профзаболеваниям. Все это может свидетельствовать о достаточно успешной практической реализации принципов, правил, норм, требований культуры безопасности в ходе осуществления производственного процесса.

Построение кривой безопасности Питера Брэдли

Для оценки рисков на предприятии, в рамках элемента системы культуры безопасности, может быть использована Кривая безопасности Питера Брэдли. Данная кривая показывает эволюцию культуры безопасности, состоящую из четырех этапов. Первый – так называемый «реагирующий» уровень травматизма (работники придерживаются правил безопасности в силу природных инстинктов). Второй, зависимый, уровень (требования по охране труда соблюдают исключительно в случае надзора, то есть работник начинает приводить в порядок средства индивидуальной защиты, а иногда даже и уходит с места работы, если видит специалиста по охране труда или руководителя). Третий, независимый уровень, характеризуется тем, что работники руководствуются не инстинктами, а сознанием, они убеждены в важности соблюдения требований культуры безопасности и заботятся не только о своей безопасности, но также могут сделать замечание или остановить работу в случае нарушений другим работником требований охраны труда. Четвертый уровень – командная работа, в которой задействованы абсолютно все работники предприятия. Важно ставить цели в области охраны труда, привлекать всех сотрудников для совместного решения тех вызовов в области культуры безопасности, которые сегодня требуют решения.

Суть кривой безопасности Брэдли (рис. 5) сводится к следующему: чем больше совместных усилий приложено для обеспечения безопасных условий труда, обучения персонала, изменения мышления каждого сотрудника компании, тем меньше вероятность возникновения инцидентов и получения травм и увечий [11].

Вывод из графической интерпретации культуры безопасности можно сделать следующий: кривая эволюции культуры безопасности в организации схематично изображает насколько снижается уровень травматизма на предприятии по мере развития культуры безопасности от бессистемного инстинктивного до осознанного коллективного предвидения опасностей и угроз.

Культура безопасности в условиях Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск

Политика в области культуры ядерной безопасности Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск (далее Филиал) утверждена приказом от 28.01.2022 № 30-п. АО «АЭМ-технологии» является предприятием, ориентированным на потребителя, осознающим социальную ответственность и осуществляющим управление процессами конструирования, изготовления и поставки продукции, исходя из приоритета обеспечения культуры безопасности при осуществлении всех действий и принятии всех решений. Главной стратегической целью предприятия в области развития и совершенствования культуры ядерной безопасности является создание, постоянное развитие и совершенствование такой среды, когда на каждом уровне организации от высшего руководства до рядовых сотрудников имеется осознание того, что безопасность имеет наивысший приоритет над другими задачами.

На рисунке 6 перечислены ключевые принципы деятельности Филиала в области развития и совершенствования культуры безопасности, а также основные направления политики руководства предприятия в области развития и совершенствования КБ.

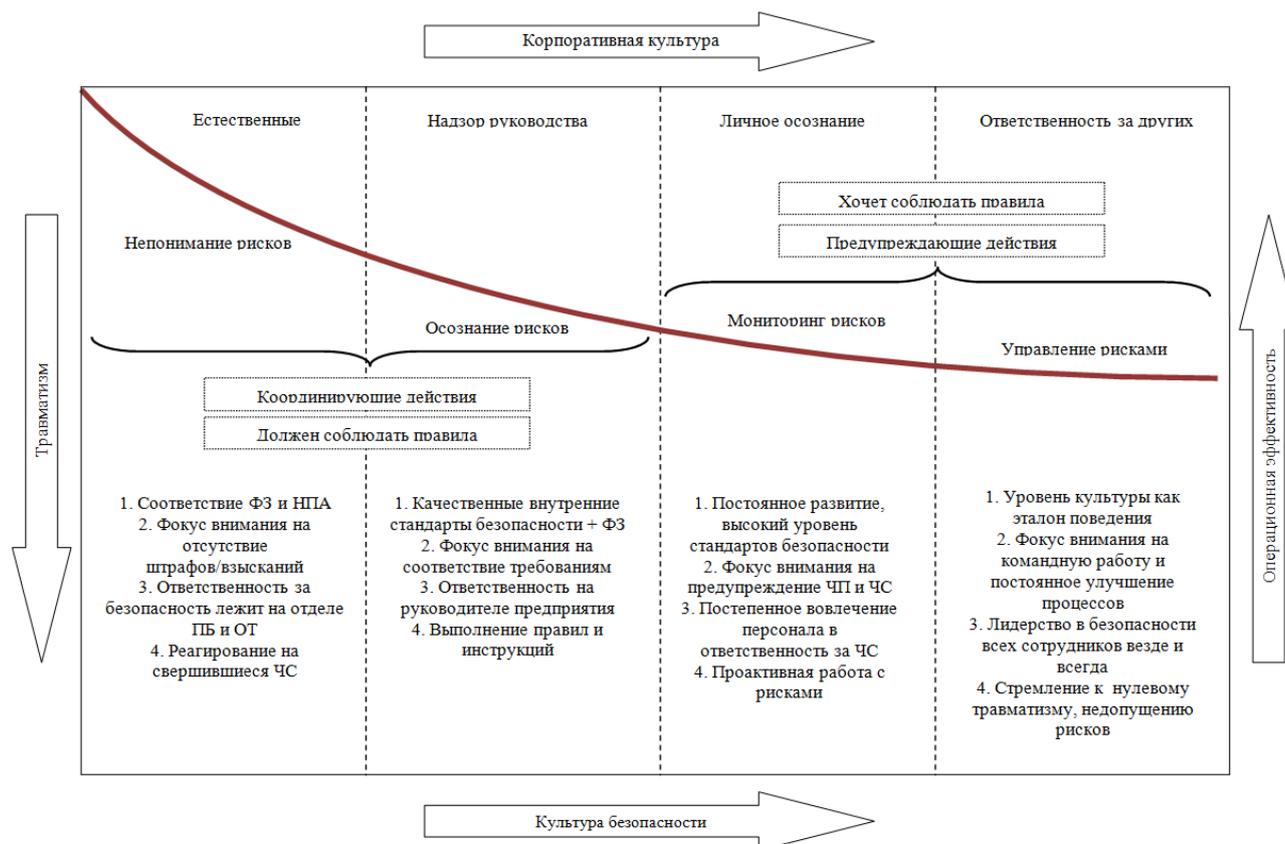


Рисунок 5. Кривая безопасности Брэдли
 Figure 5. Bradley Safety Curve

Деятельность в области развития и совершенствования культуры безопасности основывается на принципах:

- приоритет и обеспечение безопасности при принятии решений и осуществлении всех видов деятельности;
- лидирующая роль руководителей в обеспечении безопасности и качества выполнения работ, демонстрации высокого приоритета безопасности;
- распределение и описание обязанностей и ответственности в области культуры безопасности и понимание их каждым работником;
- подбор, профессиональное обучение и поддержание квалификации руководителей и иного персонала в каждой сфере деятельности, влияющей на безопасность;
- развитие атмосферы доверия, открытости, коммуникативности, информированности и сотрудничества при осуществлении производственной деятельности;
- превентивность мер, направленных на предотвращение нарушений;
- постоянное совершенствование культуры безопасности и регулярный анализ положительных практик и анализ нарушений;
- личное осознание каждым сотрудником важности безопасности и персональной ответственности за безопасность, самоконтроль работниками своей деятельности, влияющей на безопасность.

Основные направления политики руководства в области развития и совершенствования культуры безопасности:

- формирование лидерства и обеспечение безопасности на всех уровнях организации;
- постоянное совершенствование всех направлений деятельности направленных на обеспечение безопасности;
- формирование у персонала внутренней критической позиции, строго регламентированного и взвешенного подхода, которые исключают безответственность и развивают саморегулирование в вопросах безопасности;
- информирование персонала по вопросам обеспечения безопасности и о достигнутых результатах;
- непрерывный мониторинг уровня культуры безопасности посредством самооценки и внешней оценки и с применением других методов;
- продвижение принципов культуры безопасности в подрядных организациях;
- анализ и использование опыта в целях улучшения производственной деятельности и повышения уровня культуры безопасности.

Рисунок 6. Принципы и основные направления политики руководства Филиала в области развития и совершенствования КБ

Figure 6. Principles and main directions of the Branch's management policy in the field of safety culture development and improvement

Основные цели и задачи предприятия в области КБ устанавливаются Политикой машиностроительного дивизиона Госкорпорации «Росатом» в области культуры безопасности. Стратегической целью при реализации требований, предъявляемых к КБ со стороны ФНП, МАГАТЭ и Заказчиков АО «Атомэнергомаш», является обеспечение качества, поставляемого Филиалом оборудования и как следствие осуществление безопасности сложных технических объектов.

КБ предприятия, как и его организационная культура, относится к коллективным ценностям и убеждениям – это коллективный менталитет организации, характеризующий личное отношение сотрудников, как к своей деятельности, так и деятельности организации в целом. Культура безопасности устанавливает требования к исполнению персоналом важных для безопасности обязанностей:

- точное, осмысленное и ответственное выполнение должностных обязанностей;
- проведение самоконтроля и взаимоконтроля при выполнении должностных обязанностей;
- необходимые коммуникации по вопросам безопасности.

Формирование и поддержание на высоком уровне культуры организации, где основным приоритетом рассматривается вопрос обеспечения безопасности сложных технических объектов, а также её дальнейшее совершенствование достигается с помощью:

- установления приоритета безопасности над экономическими и производственными целями;
- обеспечения понимания каждым работником влияния его деятельности на безопасность и последствий, к которым может привести несоблюдение или некачественное выполнение требований КБ, программ обеспечения качества, производственных и должностных инструкций, других регламентов;
- обеспечения понимания каждым руководителем и работником недопустимости сокрытия ошибок в своей деятельности, необходимости выявления и устранения причин их возникновения, необходимости постоянного самосовершенствования, изучения и внедрения передового опыта;
- обеспечения общего понимания ключевых аспектов культуры безопасности в Филиале и у поставщиков различного уровня;
- предоставления методов и средств, позволяющих Филиалу обеспечивать коллективы и отдельных работников всем необходимым для безопасного и успешного выполнения возложенных на них задач;
- формирования у персонала на всех уровнях позитивного отношения к обучению (накоплению и обмену опытом) и формированию критического отношения к выполнению поставленных перед ним задач;
- строгого соблюдения дисциплины при четком распределении полномочий и персональной ответственности руководителей и исполнителей;
- предоставления средств и методов, с помощью которых Филиал постоянно стремится развивать свою культуру безопасности.

Если проанализировать структуру культуры безопасности Филиала АО «АЭМ-технологии»

«Атоммаш» в г. Волгодонск, то можно заметить, что она включает в себя комплекс взаимосвязанных между собой объектов и субъектов КБ.

Объектом КБ является деятельность Филиала, его структурных подразделений и должностных лиц по поддержанию КБ на высоком уровне и обеспечению её развития на основе повышения надежности и эффективности деятельности персонала, осуществляющего процессы управления, проектирования, изготовления и поставки оборудования соответствующего качества при сооружении объекта.

Субъектами культуры безопасности являются: директор Филиала, руководители структурных подразделений различного уровня, структурные подразделения, ответственные за внедрение КБ, представители подразделений, назначенные для продвижения идей КБ в своих подразделениях; ответственные за формирование, поддержание и совершенствование КБ специалисты.

Далее рассмотрим уровни приверженности культуры безопасности в Филиале:

1. Уровень политик и руководства: руководители предприятия на наиболее высоком уровне демонстрируют приверженность безопасности, они на регулярной основе уделяют время на рассмотрение вопросов, оказывающих влияние на безопасность процессов, проявляя наибольший интерес к вопросам, наиболее значимым для ядерной безопасности или качества продукции.

2. Уровень коллектива. На позицию отдельной личности в большой степени оказывает влияние рабочая атмосфера. Ключ к эффективной культуре безопасности лежит в формировании окружающих условий, в поощрении позиций персонала, ведущих к совершенствованию культуры безопасности.

3. Индивидуальный уровень. Необходимо чтобы каждый из сотрудников на всех уровнях ответственно выполнял возложенные обязанности, проявлял вопро- сительную позицию, обеспечивал необходимые коммуникации. Необходимо чтобы работники осознавали создаваемую рабочую атмосферу и выносили из нее пользу для себя и для Филиала в целом.

В целях внедрения принципов культуры безопасности во все виды деятельности Филиала были разработаны характеристики обеспечения КБ для их использования в повседневной деятельности как персоналом, так и руководителями всех уровней управления:

Приверженность безопасности:

- руководство и персонал своим поведением и отношением определяют безопасность как основной приоритет;
- культура безопасности внедрена во все виды деятельности Филиала;
- безопасность рассматривается как основной приоритет при принятии решений и осуществлении деятельности;
- безопасность имеет приоритет над экономическими показателями;
- безопасность является приоритетом при распределении ресурсов;

– безопасность культивируется руководством всех уровней управления, а безопасное поведение поощряется.

Лидерство для безопасности:

- безопасность – обязанность каждого;
- необходимо брать ответственность, являясь примером для коллег, при четком распределении ответственности и контроле исполнения;
- руководство Филиала является примером и ориентиром для персонала, в том числе в вопросах обеспечения безопасности;
- руководство показывает на деле свою приверженность безопасности;
- руководство регулярно напоминает о важности безопасности;
- руководство вовлекает персонал в вопросы улучшения безопасности;
- безопасность является ежедневной обязанностью персонала и руководителей на всех уровнях управления.

Осознание приоритета безопасности:

- важно чтобы персонал на всех уровнях управления понимал свою ответственность за выполняемую деятельность и осознавал потенциальные последствия для безопасности;
- осознание важности качества поставляемой продукции, оказываемых услуг для обеспечения безопасности сложных технических объектов;
- понимание того, что ты делаешь и для чего;
- осознание ответственности за безопасность персонала, Филиала в целом и окружающей среды;
- осознание последствий своих действий для безопасности;
- понимание того, что может пойти не так.

Прозрачность в вопросах безопасности:

- взаимодействие между руководством и персоналом строится на основе доверия;
- правильная организация передачи информации необходима для эффективной работы сотрудников в организации;
- работники должны быть уверены в том, что им могут быть доверены знания, иметь возможность сообщить о своей озабоченности как лично, так и от имени группы;
- руководство Филиала поддерживает культуру открытого общения и конструктивной критики;
- руководство стремится к формированию таких отношений с персоналом, при которых отсутствует сокрытие ошибок.

Постоянное улучшение:

- бесперебойное улучшение может рассматриваться как философия организации, в соответствии с ко-

торой подход к любой проблеме рассматривается с точки зрения возможности научиться чему-либо;

- организация постоянно осуществляет переоценку окружающих условий и приспосабливается к ожидаемым изменениям условий работы;
- поиск улучшений должен осуществляться на непрерывной основе и тиражироваться среди всех сотрудников Филиала;
- поиск возможностей для систематического обучения культуре безопасности;
- проявление инициативы в вопросах, важных для общей безопасности.

Заключение

Резюмируя, хотелось бы выделить основные мероприятия, реализация которых в условиях Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск позволит достигнуть поставленных в ходе достижения целей коллективной культуры безопасности (рис. 7).

Бесспорно, что культура безопасности – это, прежде всего, составляющий ее «человеческий фактор». Культура безопасности, следование ее принципам устанавливают перед руководством и персоналом промышленного предприятия приоритет обеспечения безопасности при принятии управленческих решений и выполнении работ. Знание устремлений, ожиданий, обеспокоенности работников в области создания условий, обеспечивающих безопасность трудовой деятельности, является одной из приоритетных задач руководства. При хорошей обратной связи руководитель предприятия может и обязан оперативно принимать меры по устранению негативных сторон «производственной жизни». [12]

В настоящее время в отрасли атомной энергетики невозможно представить обеспечение безопасности без «сильной» культуры безопасности. В статье был сделан вывод о том, что КБ – это совокупная характеристика ценностных ориентиров, моральных норм, которых придерживается человек, его приверженность декларируемой политике предприятия, стилю и правилам поведения, приверженность исполнению инструкций и процедур, то есть, всем техническим и эксплуатационным порядкам, утвержденным на предприятии. Рассмотрение опыта Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск в области создания условий для обеспечения культуры безопасности, позволяет с уверенностью сказать, что данное предприятие является «передовиком» в данном направлении, его опыт можно и нужно тиражировать на другие предприятия отрасли.

1. Демонстрация лидером приверженности принципам культуры безопасности

- Статус менеджера и директора подразумевает руководство персоналом и накладывает обязательство не только отдавать приказы и инструкции, но и являться примером для подражания. Лидер должен выполнять правила, а не просто устанавливать их.

2. Необходимость выявления угроз и контроля за рисками

- С любой ситуацией справляется не тот, кто в ней оказался, а тот, кто к ней готов. Руководителю важно уметь правильно проводить анализ угроз и рисков в целях предупреждения производственных аварий и сбоев с разработкой необходимых превентивных мер.

3. Определение и конкретизация целей

- Необходимо организовывать разработку программ в области культуры безопасности. Нужно ставить конкретные цели и выполнять определенные практические шаги. Это предусматривается системой главных показателей безопасности. Безопасность труда – явление многогранное, важно не пытаться объять необъятное, а определить приоритеты и установить цели в области безопасности труда как в среднесрочной перспективе, так и с планами на будущее.

4. Создание системы безопасности и охраны труда и достижение высокого уровня их организации

- Важно организовать и отладить систему внутренних процессов для эффективного функционирования предприятия. Работа в области обеспечения безопасности труда требует систематичности и последовательности. Как только ее механизм будет запущен, поддержание его работы не будет требовать больших усилий, более того, он окупит себя снижением как травматизма, так и материального ущерба и увеличением оборотного капитала.

5. Обеспечение безопасности и охраны труда на рабочих местах при работе со станками и оборудованием

- Для обеспечения безаварийной работы следует поддерживать рабочие места, производственные помещения, оборудование безопасными для работников. Индивидуальными, организационными и техническими мерами обеспечиваются эффективные стратегии в области охраны труда. Необходимо, чтобы оборудование, рабочие места и помещение отвечали стандартам, а влияние на ухудшение здоровья человека необходимо уменьшить или исключить.

6. Повышение квалификации и развитие профессиональных навыков

- Чтобы квалификация сотрудников соответствовала должности, которую они занимают, необходимо инвестировать в их обучение, развитие их профессиональных компетенций. Для функционирования предприятия обязательным условием становится постоянное обучение и профподготовка. Эффективной является практика создания на предприятии кафедр по производственной безопасности, где организуется институт внутренних тренеров.

7. Инвестирование в кадры и мотивация посредством личного участия

- Одной из основных обязанностей руководителя является поощрение работников за соблюдение правил безопасности. Организация может воспользоваться знаниями, идеями и способностями сотрудников, если проявляет заботу о них и активно вовлекают каждого работника в процесс охраны труда. Сотрудник активнее стремится соблюдать правила, если с ним советуются при оценке рисков или разработке рабочих инструкций.

Рисунок 7. Мероприятия в рамках обеспечения КБ в Филиале
Figure 7. Activities within the framework of safety culture provision in the Branch

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аксиненко С.П., Карякин А.М., Селезнев Ю.Н. Роль человеческого фактора в развитии атомной энергетики при безусловном обеспечении ядерной безопасности. Сборник научных трудов вузов России «Проблемы экономики, финансов и управления производством». 2010;28:146–153. EDN OZIZPH. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17792157> (дата обращения: 10.10.2023).
2. Маслова Е.А., Бажина Т.П. Культура безопасности, как основа безопасности. *Вестник магистратуры*. 2016;12(63):34–39. EDN XSHJTN. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28162684> (дата обращения: 10.10.2023).
3. Добровольский В.С., Радоуцкий В.Ю. Культура безопасности жизнедеятельности - функциональная основа системы обеспечения безопасности и устойчивого развития Российской Федерации. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2011;2:161–164. EDN NYATSF. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16543863> (дата обращения: 10.10.2023).
4. Васильева И.И. Культура безопасности: управлять или... лучше не надо? *Психолог*. 2016;5:24–33. EDN XBARUX. <https://doi.org/10.7256/2409-8701.2016.5.19883>
5. Нилова Е.В., Хомякова В.С. Сущность понятия «культура безопасности труда». *Молодежь и наука*. 2022;(10). EDN QFCTXH.
6. Букринский А.М. Культура безопасности как организационная субкультура. *Методы менеджмента качества*. 2014;3:39–45. EDN SAXLYD. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21427708> (дата обращения: 10.10.2023).
7. Мальгин Е.Л. Культура безопасности жизнедеятельности как фактор совершенствования охраны труда. *Молодежь и наука: шаг к успеху: сборник научных статей 5-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых. В 4-х томах, Курск, 22–23 марта 2021 г.; отв. редактор М.С. Разумов. Том 4*. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. С. 27–30. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45605096> (дата обращения: 10.10.2023).

8. Руденко В.А., Василенко Н.П. Культура безопасности в системе ценностей госкорпорации «РОСАТОМ». *Глобальная ядерная безопасность*. 2016;1(18):118–122. EDN VVBZRI. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25914032> (дата обращения: 10.10.2023).

9. Руденко В.А., Попова Т.С., Евдошкина Ю.А. Обеспечение высокого уровня культуры безопасности при экспорте ядерных энергетических технологий за рубеж. *Безопасность ядерной энергетики: тезисы докладов XVII Международной научно-практической конференции, Волгодонск, 26–28 мая 2021 года*. Волгодонск: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2021. С. 6–3–65. EDN YPDEJF. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46406370> (дата обращения: 10.10.2023).

10. Степченко Т.С. Аспекты восприятия общественностью процессов развития атомной энергетики (на примере РоАЭС). *Практический маркетинг*. 2014;7(209):35–40. EDN QLLJAG. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21703131> (дата обращения: 10.10.2023).

11. Прыгунов П.В. Культура безопасности - приоритет производственной деятельности. *Молодой ученый*. 2019;26(264):373–375. EDN ZTDPBO. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38512975> (дата обращения: 10.10.2023).

12. Коваль И.В., Виничук О.Ю. Социально-этический маркетинг: использование технологий в деятельности региональной компании. *Практический маркетинг*. 2018;8(258):28–33. EDN UVPVPM. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35357465> (дата обращения: 10.10.2023).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Попова Т.С. – анализ особенностей культуры безопасности на промышленном предприятии, анализ данных Минтруда, ФСС, Росстата относительно уровня травматизма за последние 10 лет, написание текста статьи;

Руденко В.А. – концепция и качественная разработка исследования;

Попов А.А. – исследование особенностей концепции культуры безопасности в Филиале АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск;

Бондаренко В.А. – изучение и анализ динамики уровня публикационной активности авторов в российской научной электронной библиотеке на тематику культуры безопасности за последние 10 лет;

Евдошкина Ю.А. – концептуализация статьи, предоставление материалов авторских исследований по теме.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Татьяна Сергеевна Попова, к.э.н., доцент кафедры экономики и социально-гуманитарных дисциплин, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0554-2672>

WoS Researcher ID: ID: ABL-4774-2022

e-mail: TSPopova@mephi.ru

Валентина Анатольевна Руденко, д.с.н., заведующий кафедрой экономики и социально-гуманитарных дисциплин, руководитель, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6698-5469>

WoS Researcher ID: B-7730-2016

e-mail: VARudenko@mephi.ru

Андрей Александрович Попов, ведущий специалист по инвестиционному развитию Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г.Волгодонск, г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2828-0410>

e-mail: popov_aa@atom mash.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Popova T.S. – analysing the peculiarities of safety culture at an industrial enterprise, analysing the data of the Ministry of Labour, Social Insurance Fund, Rosstat regarding the injury rate for the last 10 years, writing the text of the article;

Rudenko V.A. – concept and qualitative development of the research;

Popov A.A. – research of safety culture concept peculiarities in the Atommash the branch of AEM-technologies JSC in Volgodonk;

Bondarenko V.A. – study and analysis of the dynamics of the level of publication activity of authors in the Russian scientific electronic library on the subject of safety culture for the last 10 years;

Evdoshkina Yu.A. – conceptualisation of the article, provision of materials of author's research on the topic.

FUNDING:

The study had no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Tatyana S. Popova, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Economics and Social and Humanitarian Disciplines, Volgodonk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0554-2672>

WoS Researcher ID: ABL-4774-2022

e-mail: TSPopova@mephi.ru

Valentina A. Rudenko, Dr. Sci. (Soc.), Head of the Department of Economics and Social and Humanitarian Disciplines, Head of Volgodonk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6698-5469>

WoS Researcher ID: B-7730-2016

e-mail: VARudenko@mephi.ru

Andrey A. Popov, leading specialist in investment development of Atommash the branch of JSC AEM-Technologies in Volgodonk, Volgodonk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2828-0410>

e-mail: popov_aa@atom mash.ru

Виктория Андреевна Бондаренко, д.э.н., доцент, зав. кафедрой маркетинга и рекламы. ФГБОУ ВО «Ростовский государственный экономический университет (РИНХ)», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2921-7548>

WoS Researcher ID: AAC-8778-2020

e-mail: b14v@yandex.ru

Юлия Александровна Евдошкина, старший преподаватель кафедры экономики и социально-гуманитарных дисциплин, начальник учебно-методического отдела, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6704-0643>

e-mail: YAEvdoshkina@mephi.ru

Viktoriy A. Bondarenko, Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor, Head of Marketing and Advertising Department. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Rostov State University of Economics (RSUE)», Rostov-on-Don, Russian Federation..

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2921-7548>

WoS Researcher ID: AAC-8778-2020

e-mail: b14v@yandex.ru

YuliA Evdoshkina, senior lecturer, Department of Economics and Social and Humanitarian Disciplines, Head of Training and Methodology Department, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6704-0643>

e-mail: YAEvdoshkina@mephi.ru

Поступила в редакцию 30.10.2023

После доработки 01.12.2023

Принята к публикации 07.12.2023

Received 30.10.2023

Revision 01.12.2023

Accepted 07.12.2023

КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ И
СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
SAFETY CULTURE AND SOCIO-ECONOMIC ASPECTS
DEVELOPMENT OF PLACEMENT TERRITORIES
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 338.24: 351.862.6: 621.039
<https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-09>
EDN YSMIKU



Парадигма ресурсосберегающего менеджмента в проектах предприятий
машиностроительного дивизиона ГК «Росатом»

М.В. Головко¹  , А.М. Потявин¹, И.А. Ухалина² , А.В. Анцибор² ,
Н.А. Ефименко² , Ж.С. Рогачева² 

¹ Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, г. Краснодар, Россия

² Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Россия

 golovko178@mail.ru

Аннотация. В статье проведен анализ современных проблем и успешных практик внедрения бережливых технологий на российских предприятиях. Целью представленной научно-исследовательской работы является разработка релевантных механизмов, поиск инструментов и технологий, с помощью которых указанные проблемы (общие и специфические) могут быть преодолены. Новизна исследования заключается в обосновании перехода к новой парадигме ресурсосберегающего менеджмента и адаптации инструментов проектного управления и бизнеса-анализа к проектам внедрения бережливых технологий. Для исследования тенденций формирования новой парадигмы менеджмента, основанной на активном вовлечении инструментов ресурсосбережения, применялись такие общенаучные методы, как анализ научной и специализированной литературы, синтез, логический и аналитический. В работе были использованы материалы внутренней отчетности предприятий машиностроительного дивизиона ГК «Росатом». Сформулированы и проработаны основные проблемы внедрения бережливых технологий на российских предприятиях. Представлен перечень методик управления предприятием в соответствии с новой парадигмой менеджмента, а также их возможности по повышению эффективности управленческих решений. Обосновано значение цифровых технологий для обеспечения результативности ресурсосберегающих проектов. Разработана примерная стратегическая карта для предприятий атомного энергетического машиностроения, составленной на основе методики сбалансированной системы показателей, при реализации бережливых решений. Определены наиболее эффективные проекты предприятий машиностроительного дивизиона Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», которые могут стать объектами бенчмаркинга для масштабирования опыта среди предприятий других дивизионов госкорпорации, а также для предприятий других отраслей и сфер деятельности. Несмотря на достаточно высокую степень разработанности проблемы внедрения бережливых технологий, новые реалии формируют специфические факторы, которые могут сделать неактуальными предыдущие научно-практические результаты. Дальнейшие исследования данной темы необходимо проводить на основе анализа динамики внешней среды, приводящей к колебаниям на отраслевых и региональных рынках.

Ключевые слова: ресурсосберегающий менеджмент, бережливые технологии, проекты развития, эффективность, ПСР-проекты, ГК «Росатом», атомное энергетическое машиностроение, бенчмаркинг, методики повышения эффективности.

Для цитирования Головко М.В., Потявин А.М., Ухалина И.А., Анцибор А.В., Ефименко Н.А., Рогачева Ж.С. Парадигма ресурсосберегающего менеджмента в проектах предприятий машиностроительного дивизиона ГК «Росатом». *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(4):71–79. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-09>

For citation: Golovko M.V., Potyvin A.M., Ukhulina I.A., Antsibor A.V., Efimenko N.A., Rogacheva Zh.S. Resource-saving management paradigm in projects of Rosatom State Corporation machine-building division enterprises. *Global Nuclear Safety*. 2023;(1):71–79 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-09>

Resource-saving management paradigm in projects of Rosatom State Corporation machine-
building division enterprises

Mariy V. Golovko¹  , Andrey M. Potyvin¹, Irina A. Ukhulina¹ ,
Anna V. Antsibor¹ , Nina A. Efimenko¹ , Zhanna S. Rogacheva¹ 

¹ I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

² Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk,
Rostov region, Russia

 golovko178@mail.ru

Abstract. The article analyzes current problems and successful practices of implementing lean technologies at Russian enterprises. The purpose of the presented research work is to develop relevant mechanisms, search for tools and technologies with the help of which the mentioned problems (general and specific) can be overcome. The novelty of the research lies in the justification of the transition to a new paradigm of resource-saving management and adaptation of project management and business analysis tools to the projects of lean technology implementation. To investigate the trends in the formation of a new management paradigm based on the active involvement of resource-saving tools, such general scientific methods as analysis of scientific and specialized literature, synthesis, logical and analytical methods were used. Materials of internal reporting of the enterprises of the machine-building division of Rosatom State Corporation are used in the work. The main problems of implementing lean technologies at Russian enterprises are formulated and ranked. The list of enterprise management techniques in accordance with the new management paradigm is presented, as well as their capabilities to improve the efficiency of management decisions. The importance of digital technologies for ensuring the effectiveness of resource-saving projects is substantiated. An approximate strategic map for nuclear power engineering enterprises, based on the balanced scorecard methodology, in the implementation of lean decisions is developed. The most effective projects of enterprises of the machine-building division of the State Atomic Energy Corporation ROSATOM were identified, which can become benchmarking objects for scaling experience among enterprises of other divisions of the State Corporation, as well as for enterprises of other industries and spheres of activity. Despite the rather high degree of development of the problem of lean technology implementation, new realities form specific factors that can make the previous scientific and practical results irrelevant. Further research of this topic should be carried out on the basis of analyzing the dynamics of the external environment leading to fluctuations in the industry and regional markets.

Keywords: resource-saving management, lean technologies, development projects, efficiency, PSR-projects, Rosatom State Corporation, nuclear power engineering, benchmarking, efficiency improvement methods.

Введение

Конфигурация современных экономических реалий характеризуется неопределенностью и вызовами, связанными с эпидемиологическими условиями и усложнением внешнеполитической обстановки. Это предъявляет особые требования к организации логистики, формированию цепочки поставок и всех внутренних процессов предприятий машиностроительного комплекса и атомной отрасли в целом. В то же время, любой кризис – это не только и не столько реакция на возникающие проблемы, сколько поиск новых возможностей совершенствования деятельности, например, в направлении реорганизации, пересмотра стратегических ориентиров, выявления резервов повышения экономической эффективности за счет более рационального и инновационного ориентированного использования всех видов ресурсов.

Несмотря на весьма ощутимые выгоды и широкое распространение концепции, менеджмент российских промышленных предприятий часто испытывает трудности при ее внедрении. Значительное число тех компаний, начавших применять инструменты бережливого производства, вынуждены были отказаться от данного подхода в силу отсутствия существенных результатов. В качестве основных проблем российских предприятий, в силу которых они отказываются от концепции бережливого производства, выделяют следующие. Во-первых, сопротивление персонала, связанное как с нежеланием менять привычные алгоритмы работы, изучать новые подходы и перестраиваться, так и с недостаточной информационно-разъяснительной работой, проводимой руководством предприятий, отсутствием должных организационных изменений. Во-вторых, излишнее стремление получить быстрые и значительные результаты, несмотря на то, что опыт японских компаний свидетельствует о десятках лет, потребовавшихся на внедрение бережливого производства. Философия бизнеса не может меняться в одночасье, к этому нужно прийти долгим и

серьезным путем. В то же время нельзя не отметить тот факт, что в результате широкого распространения опыта перехода на рассматриваемую концепцию, скорость ее внедрения на российских предприятиях значительно ниже, чем ранее на зарубежных.

В связи с вышеизложенным, одной из актуальных проблем научно-исследовательской работы в данном вопросе является разработка релевантных механизмов, поиск инструментов и технологий, с помощью которых указанные проблемы (общие и специфические) могут быть преодолены. Для достижения цели необходимо проанализировать проблемы, характерные для внедрения бережливого производства на предприятии промышленного сектора, представить классификацию и ранжирование выявленных проблем, рассмотреть эффективные кейсы предприятий, которые могут быть объектом бенчмаркинга для остальных хозяйствующих субъектов.

Для исследования тенденций формирования новой парадигмы менеджмента, основанной на активном вовлечении инструментов ресурсосбережения, применялись такие общенаучные методы, как анализ научной и специализированной литературы, синтез, логический и аналитический. В процессе анализа опубликованных экспертных мнений и оценок, сделаны выводы о перспективах внедрения элементов ресурсосберегающего менеджмента на предприятиях. В работе были использованы материалы внутренней отчетности предприятий машиностроительного дивизиона ГК «Росатом». Интеграция указанных общенаучных методов позволила прийти к логическим выводам и сформулировать ряд рекомендаций.

Результаты

Обратимся к результатам исследования организации ООО «Лин Консалт», миссией которой является содействие российским предприятиям и организациям

(а также резидентам СНГ)¹ в сфере внедрения результативных методик повышения эффективности производственных систем, а также к исследованиям российских экспертов в области бережливого производства^{2,3} [1-3]. На основе анализа были определены и проранжированы проблемы внедрения концепции бережливого производства на российских предприятиях, результаты представлены на рисунке 1.

Проанализировав информацию, содержащуюся в указанных источниках, предлагаем разделить проблемы внедрения бережливого производства на две группы:

- 1) непосредственно связанные с внедрением инструментов (методов) бережливого производства;
- 2) связанные с сопротивлением изменениям [6].

Проблемы первой группы обычно связаны с недостаточной теоретической подготовкой сотрудников разных уровней и неотлаженной системой коммуникаций между подразделениями, а также с определенной «оторванностью» высшего менеджмента от практики, от производственных участков, где находятся места создания ценности. Проблемы второй группы обусловлены создаваемыми со стороны работников препятствиями внедрению новой концепции. Данная проблема является остроактуальной, поскольку от мотивации сотрудников к стратегическим изменениям зависит их результативность. Для ее решения, как отмечают Э. Кондратьев⁴ и М. Головко [7], мнение которых авторы полностью разделяют, необходимо опираться на такие ориентиры, как культура, лидерство, вовлеченность и мотивация. В качестве инструмента здесь может послужить бенчмаркинг, реализуемый через постоянную информационно-разъяснительную работу с коллективом с демонстрацией успешных кейсов внедрения технологий бережливого производства. Далее представим некоторые современные результаты внедрения бережливых технологий на предприятиях машиностроительного дивизиона ГК «Росатом», которые могут послужить основой инструментария бенчмаркинга.

Новые задачи государства по переходу от импортозамещения к технологической независимости

должны быть положены в основу стратегических ориентиров промышленных предприятий ГК «Росатом». Особая роль отводится, безусловно, производству комплектующих, цифровым решениям в машиностроительном комплексе. Как отметил глава госкорпорации А. Лихачев, необходимо готовиться к технико-технологической, управленческой и человеческой мобилизации производства для обеспечения возможности адекватного ответа вызовам, формирующимся во внешнеэкономической и внешнеполитической среде.

В качестве основного тренда, формирующего резервы развития, следует отметить цифровизацию. Синергетический эффект, достигаемый на основе комбинации подходов «Lean + Smart», позволяет достичь эффективности управления производственными процессами. Например, в условиях АО «Чепецкий механический завод» (более 8 тыс. номенклатур в производстве), при планировании производства, скорость реагирования на отклонения после оптимизации сократилась с 24 часов до 8 часов, а при создании цифрового образца – происходит в режиме реального времени.

В АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И.И. Африкантова», в заготовительном цехе №90 после оптимизации количество рекламаций, сопровождающихся возвратом продукции, сократилось с 3% до 1,5%, после цифровизации – составило менее 1%.

Еще одним важным направлением реализации стратегии ресурсосбережения является масштабная отраслевая компактизация производства. За прошедший десятилетний период (2011-2021 гг.) было реализовано 22 проекта, 18 из которых находятся в работе. Так, в качестве примера можно привести проект АО «ПО Север» в г. Новосибирск, где в результате качественных преобразований количество перемещений снизилось в 1,7 раза, время протекания процессов (ВПП) – в 1,75 раза, а объем незавершенного производства в 2,7 раза. Успешная реализация проектов по компактизации позволит высвободить пространство для организации производства новой продукции, особенно в условиях растущего спроса в новых экономических реалиях.

Развитие человеческого потенциала является основой для реализации всех ПСР-проектов, поскольку именно люди, обладающие необходимыми компетенциями и с соответствующей мотивацией, выполняют действия, направленные на повышение эффективности деятельности промышленного предприятия.

Опираясь на методики вовлечения всех заинтересованных сторон (стейкхолдеров) в ПСР-проекты, в частности РМВоК (свод знаний в области управления проектами), ВАВОК (свод знаний в области бизнес-анализа), можно отметить важность процессов интеграции всех участников проектной деятельности на ранних этапах разработки и реализации в зависимости от их статуса и роли в проекте.

¹ Тренинг «Основы Бережливого производства» для сотрудников Новомосковского Завода Полимерных Труб [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.lean-consult.ru/news/lc-news/osnovy-berzhlivogo-proizvodstva-dlya-nzpt/> (дата обращения: 02.08.2023).

² Беляева И.И. Результаты применения бережливого производства в российских компаниях. Издание о бизнесе и технологиях. – Режим доступа: www.equipnet.ru/management/articles/articles_906.html (дата обращения: 02.08.2023).

³ Зинченко С.П. Внедрение концепции Производственных систем в России: типичные препятствия и вызовы. Альманах «Управление производством». 04 марта 2013 г. – Режим доступа: https://up-pro.ru/library/production_management/systems/vnedrenie-ps/ (дата обращения: 22.08.2023).

⁴ Кондратьев Э.В. Синергетический менеджмент для бережливых производственных систем. Доклад (презентация) 26-й Межотраслевой конференции «Эффективный менеджмент: Качество, Lean, Риски». – Режим доступа: https://centrprioritet.ru/images/stories/26Conf/02_Kondratyev.pdf (дата обращения: 25.08.2023).

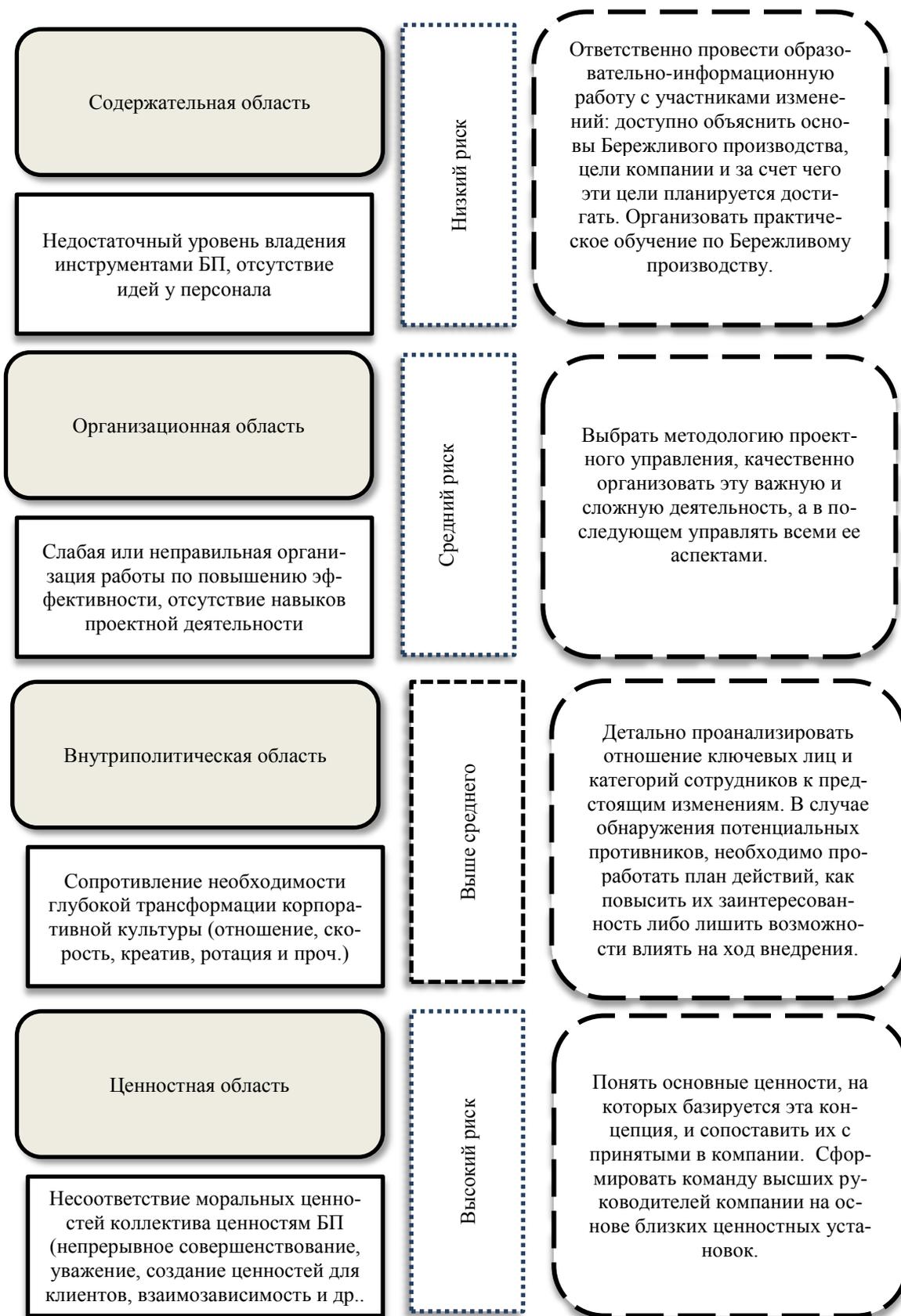


Рисунок 1. Ранжированные проблемы внедрения концепции бережливого производства и пути их преодоления (составлено авторами по [1-5])

Figure 1. Ranked problems of lean manufacturing concept implementation and ways to overcome them (compiled by the authors according to [1-5])

Так, в качестве рекомендации можно отметить необходимость привлечения специалистов ПСР не на стадии защиты проектов компактизации, как это делалось ранее, а на этапе разработки. Это позволит исследовать процессы и потоки максимально оперативно и предлагать адекватные решения по их оптимизации.

Таблица 1. Перечень рекомендованных методик и инструментов стратегического анализа при принятии управленческих решений (составлено авторами)

Table 1. List of recommended methods and tools for strategic analysis in management decision-making (compiled by authors)

Наименование методики/инструмента/стандарта	Содержание	Преимущества и области применения
Balanced Score Card (BSC) (Сбалансированная система показателей)	Концепция переноса и декомпозиции стратегических целей предприятия до уровня оперативного управления и контроль выполнения посредством ключевых показателей эффективности (Key Performance Indicators, KPI). Предполагает систематизацию целей, задач, мероприятий по четырем проекциям: потенциал, бизнес-процессы, рынок и финансы.	Система управления эффективностью деятельности предприятий ГК «Росатом» основана на двух ключевых составляющих: KPI и ценности потребителя. На основе стратегических целей (повышение доли на международных рынках, снижение себестоимости продукции и сроков протекания процессов, создание новых продуктов для российского и международного рынков, безопасные условия деятельности) сформированы верхнеуровневые KPI, которые затем и оцифрованы по критериям SMART по всем дивизионам ГК «Росатом». В базис BSC закладывает человеческий потенциал.
PMBoK 7.0	Международный стандарт в области управления проектами	Позволяет организовать проектную деятельность по единому алгоритму, что упрощает процедуры контроля. Дает возможность систематизировать входную и выходную информацию, унифицировать документацию по проектам, обеспечить управление всеми видами ресурсов: материальных, человеческих, временных
BABoK	Международный стандарт в области бизнес-анализа, содержащий алгоритмы и описание инструментов проведения бизнес-анализа с целью обеспечения возможности изменений предприятия через определение потребностей и рекомендацию решений, приносящих пользу заинтересованным сторонам	Позволяет максимально полно учесть интересы всех стейкхолдеров проекта на основе применения разнообразных методик бизнес-анализа, выявить причины возникновения проблем на различных участках деятельности, предложить решения, обладающие ценностью для всех заинтересованных сторон и разработать предложения по дальнейшему развитию бизнеса
Boston Consulting Group Matrix (BCG) Матрица БКГ	Инструмент портфельного анализа в стратегическом менеджменте и маркетинге, дает возможность определить актуальность и рентабельность продуктов и проектов предприятия исходя из текущей ситуации на рынке и доли рынка, занимаемой продукцией предприятия	Позволяет оценить «рентабельность» каждого проекта/продукта, также дает возможность провести ранжирование по группам деятельность дивизионов в зависимости от уровня инновационной активности, доходов от текущей деятельности, доли на рынке и т.п.
Бенчмаркинг	Набор методик и алгоритмов, позволяющих оценить возможность использования полученного положительного опыта конкурентов в рамках собственного бизнеса. Положительные практики рассматриваются как эталон, к которому стремятся при постановке целей стратегических изменений. Например, при изменениях в бизнес-процессах, походах, управлении затратами, качеством, лояльностью стейкхолдеров и проч.	Позволяет повысить эффективность деятельности на основе прогрессивного опыта. Примером может служить внедрение технологий бережливого производства и различные кайдзен-методики ведущих зарубежных компаний.

Пример использования BSC для построения системы стратегических целей в области цифровизации бизнес-процессов, включая бережливое производство, рассмотрено авторами в [8], где отмечено, что в российской атомной отрасли к 2020 г. было создано бо-

Далее, в таблице 1 представим перечень методик управления предприятием в соответствии с новой парадигмой менеджмента, а также их возможности по повышению эффективности и результативности управленческих решений.

лее 128 цифровых решений в сфере производственного менеджмента, управления проектами, НИОКР и проч. Инструменты цифровизации по проекциям сбалансированной системы показателей представлены в таблице 2.

Таблица 2. Инструменты цифровизации Росатома в рамках проекций BSC [8]

Table 2. Tools of Rosatom's digitalization within the BSC projections [8]

Проекция BSC	Инструменты цифровизации Росатома
Финансы	Все нижеперечисленные проекты способствуют повышению инвестиционной привлекательности отрасли, территорий размещения объектов Росатома, увеличению рыночной стоимости предприятий Росатома, снижению рисков финансовых потерь вследствие угроз технологической и экономической безопасности.
Рынок	<ul style="list-style-type: none"> - ЦОД (центр обработки данных) «Калининский» АО «Концерн Росэнергоатом», предоставляющий облачные инфраструктурные решения на внешний рынок; - российская платформа «Умный город» (АО «Русатом Инфраструктурные решения»), ориентированная на цифровизацию городских сервисов (проект направлен, прежде всего, на формирование благоприятной городской среды территорий размещения АЭС); - услуги для внешних заказчиков на основе собственных ЦОД (центров обработки документации); - вывод на новые коммерческие рынки цифровых продуктов.
Бизнес-процессы	<ul style="list-style-type: none"> - проект перевода ЕОСДО (единой отраслевой системы документооборота) АО «Гринатом» (интегратор ИКТ направления Росатома) на российскую цифровую платформу; - цифровизация Производственной системы Росатома и Lean-технологий (создание цифровых ПСР-образцов), ориентированных на минимизацию операционных затрат и повышение эффективности эксплуатации оборудования; - разработка и внедрение систем виброакустического контроля и диагностики оборудования АЭС¹; - система полного жизненного цикла «Цифровое предприятие»
Потенциал	<ul style="list-style-type: none"> - переход на отечественную HRM-систему Alfa-HRMS – Alfa / Управление персоналом (управление организационным построением, кадровый учет, планирование и учет рабочего времени, расчет зарплаты); - система мобильного обучения; - подготовка проектных команд, решающих задач цифровизации инфраструктуры и достижения технологической независимости; - разработка и внедрение виртуальных тренажеров для подготовки оперативного персонала АЭС; - разработка методических материалов для персонала; - видеоаналитика и охрана труда (контроль отсутствия средств индивидуальной защиты, распознавание и обнаружение лиц, обнаружение громких звуков, очагов возгорания; контроль местонахождения, падения, активности, «тревожная кнопка» оповещения о чрезвычайной ситуации); - цифровизация культуры экономической безопасности [9]

Представленным списком не исчерпываются цифровые трансформации и продукты Росатома, реализация стратегии набирает темпы и характеризуется многоаспектными результатами. Финансирование комплексной программы Росатома по развитию техники, технологий и исследований в области использования атомной энергии до 2024 г. оценивается в 700-800 млрд. рублей.

Пример стратегической карты для предприятий атомного энергетического машиностроения, составленной на основе методики BSC, при реализации бережливых решений представлен на рисунке 2. Как видно из представленной стратегической карты, одним из резервов повышения эффективности является развитие поставщиков. Здесь речь идет о необходимости решения проблем, связанных с переносом сроков производства и строительства из-за срывов поставок. Так, согласно экспертным оценкам, до 30% переноса сроков строительства вправо происходит из-за срывов поставок оборудования, порядка 20% договоров поставки не выполняются в срок по вине постав-

щика.

В качестве решения можно предложить системное развитие производственных систем у поставщиков по результатам ПСР-аудита на объектах, где выявлены наибольшие риски невыполнения договорных обязательств в целях импортозамещения. Таким образом, в очередной раз на практике будет применена методика бенчмаркинга, предполагающая передачу апробированного положительного опыта для оптимизации деятельности предприятий-партнеров.

Эта же методика представляется эффективной при тиражировании лучших практик в области использования резервов человеческого потенциала. Например, путем развития опыта создания цеховых клубов, представляющих собой профессиональные сообщества горизонтального уровня (единая иерархическая ступень), для обмена опытом, навыками, распространения и сохранения критически важных знаний. Уже достаточно успешно функционируют клубы механосборочных и многономенклатурных цехов, проектировщиков, технических директоров,

¹ Волков В. Расчеты в условиях неопределенности. Вестник АЭМ 2.0. 2022. №2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vestnik-aem.ru/upload/iblock/c3d/zpaw207f8xelbntkdq8uol6jeiwpbvrj.pdf> (дата обращения 04.05.2023)

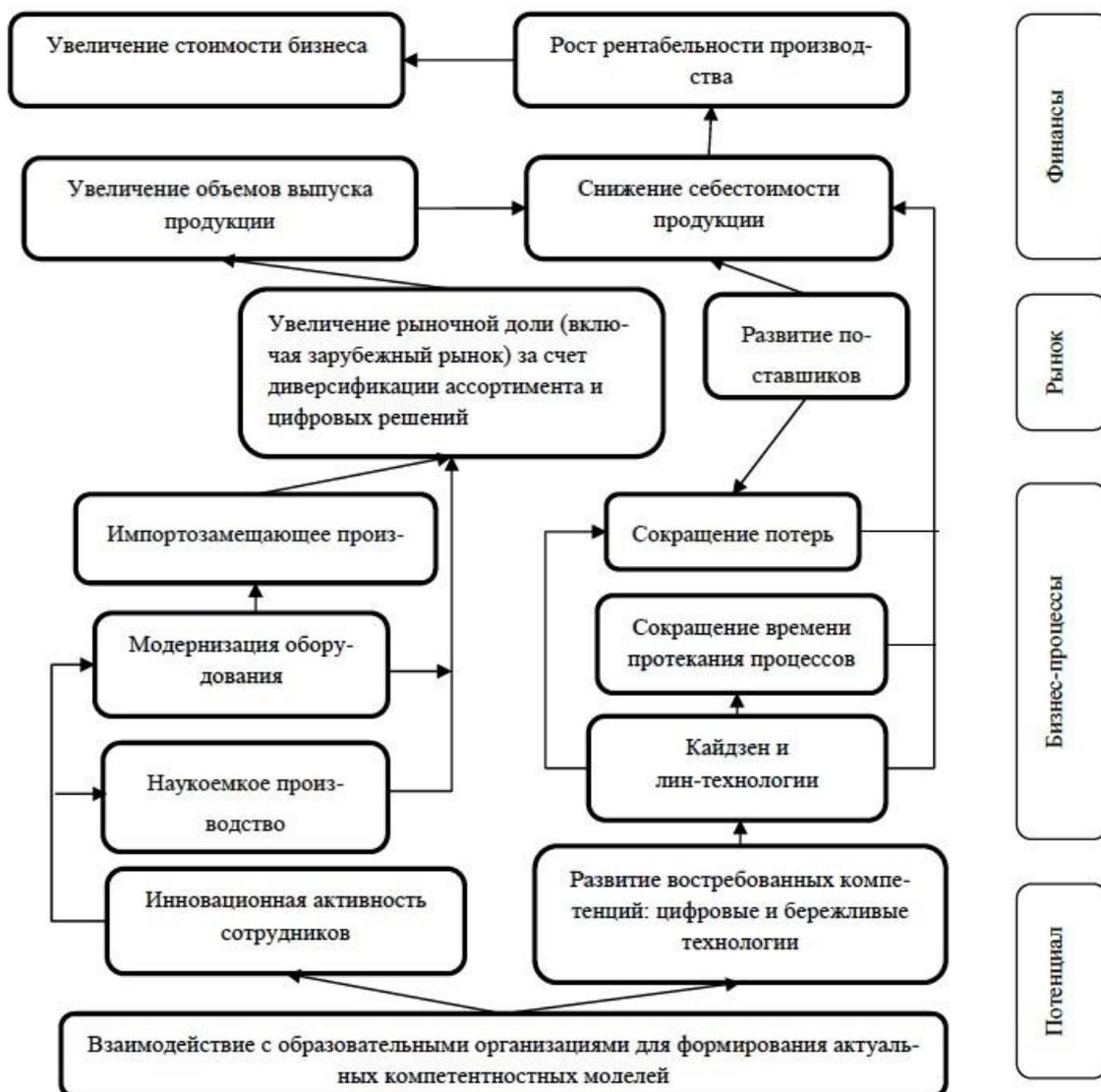


Рисунок 2. Пример стратегической карты при внедрении бережливых решений (составлено авторами)

Figure 2. An example of a strategy map for implementing lean solutions

технических заказчиков, ускоренному тиражированию бережливых практик способствует создание Фонда развития производственных системы и промышленного туризма.

Пилотные проекты 2022 г. по развитию промышленного туризма охватывают 20 предприятий в 16 регионах РФ. По мнению экспертов, этот формат даст возможность вовлечь значительное количество национальных предприятий для масштабирования опыта внедрения бережливых технологий и практик ПСР, накопленного предприятиями ГК «Росатом».

Выводы

На основе проведенного анализа сделаем следующие выводы. Условно все проблемы внедрения бережливого производства можно разделить на две группы: связанные с внедрением инструментов (методов) бережливого производства и связанные с сопротивлением изменениям. Эффективными инструментами разрешения данных проблем являются мето-

дики стратегического и проектного менеджмента, а также информационно-разъяснительная работа с коллективом с демонстрацией успешных кейсов внедрения технологий бережливого производства. Рассмотрены возможности и результаты цифровизации для повышения экономической эффективности и безопасности деятельности предприятий на основе анализа существующих и потенциально возможных трендов. Приведены экспертные и авторские оценки результативности внедрения инструментов цифровизации для организации бережливого производства. Обоснована необходимость не просто использования отдельных «кайдзен», а перехода к новой парадигме ресурсосберегающего менеджмента на основе стратегических методов, алгоритмов и технологий: проектного управления, бенчмаркинга, сбалансированной системы показателей и проч. Дальнейшие исследования данной темы необходимо проводить на основе анализа динамики внешней среды, приводящей к колебаниям на отраслевых и региональных рынках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Маркова Н.А., Марков Д.А. Проблемы внедрения концепции бережливого производства на предприятиях. *Управление*. 2018;9(6):40–48. Режим доступа: <https://elibrary.ru/vyqjnj> EDN: YYQJNJ (дата обращения: 22.08.2023).
2. Анутова О.Н., Федоськина Л.А. Распространение принципов бережливого производства на российских предприятиях: проблемы и перспективы. *Системное управление*. 2012;1(14). Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22944047> EDN: TICEZL (дата обращения: 22.08.2023).
3. Dutta A.B., Banerjee S. Review of lean manufacturing issues and challenges in manufacturing process. *International Journal of Research in Business Management*. 2014;2(4):27–36. Available at: https://www.academia.edu/6626365/1_Review_of_Lean_Manufacturing_Issues_and_Challenges_in_Manufacturing_Process (accessed: 22.08.2023).
4. Марков Д.А., Маркова Н.А., Попов В.Л. Бережливое и быстро реагирующее производство. Монография. Пермь: Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2018. 324 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/record/01009631089> (дата обращения: 22.08.2023).
5. Руденко В.А., Головко М.В., Агапова С.П., Анцибор А.В., Ефименко Н.А., Ухалина И.А. Опыт и перспективы подготовки LEAN-специалистов на основе эффективного взаимодействия вуза и предприятий ГК «Росатом». *Глобальная ядерная безопасность*. 2018;1(26):119–128. Режим доступа: <https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb.2018.1.pdf> (дата обращения: 22.08.2023).
6. Головко М.В., Потявин А.М., Хуако А.Х. Проекты бережливого производства: проблемы и перспективы в российских реалиях. *Проектный и инвестиционный менеджмент в условиях новой экономической реальности : материалы IV Национальной научно-практической конференции, Краснодар, 06 апреля 2023 года*. Краснодар: ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго России Краснодарский ЦНТИ- филиал ФГБУ «РЭА» Минэнерго России, 2023. С. 146–153. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53752579> (дата обращения: 25.08.2023).
7. Головко М. В. Культура экономической безопасности и ее стратегическое значение для атомной энергетики. *Глобальная ядерная безопасность*. 2015;2(15):100–105. Режим доступа: https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gns_15.pdf (дата обращения: 25.08.2023).
8. Golovko M., Antsibor A., Rogacheva Z., Myasoedov S., Plotnikov V. Management processes digitalization for organization's economic security ensure. In: *Beskovylny A., Shamsyan M., Artiukh V. (eds). XV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2022». Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. Vol. 574. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21432-5_215
9. Головко М.В., Анцибор А.В., Рогачева Ж.С. К вопросу о влиянии цифровых технологий на экономическую безопасность предприятий. Безопасность ядерной энергетики: тезисы докладов XVII Международной научно-практической конференции, Волгоград, 26–28 мая 2021 года. Волгоград: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2021. С. 66–69. Режим доступа: http://nps.viti-mephi.ru/files/page/file/viti_sbornik_tezisov_byae-2021.pdf (дата обращения: 25.08.2023).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Головко М.В. – концептуализация статьи, предоставление материалов авторских исследований по изучаемой проблеме;
Потявин А.М. – систематизация критериев и ранжирование проблем внедрения бережливых технологий;
Ухалина И.А. – установление взаимосвязи между содержанием проблемы и существующими методиками их преодоления;
Анцибор А.В. – составление перечня показателей для сбалансированной системы показателей;
Ефименко Н.А. – построение стратегической карты на основе сбалансированной системы показателей;
Рогачева Ж.С. – изучение, обработка и систематизация публикаций по изучаемой проблеме.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Мария Владимировна Головко, д.э.н., профессор кафедры институциональной экономики и инвестиционного менеджмента, Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, г. Краснодар, Российская Федерация.
 ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4835-9800>
 e-mail: golovko178@mail.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Golovko M.V. – conceptualization of the article, providing materials of the author's research on the problem under study;
Potyavin A.M. – systematization of criteria and ranking of problems of lean technology implementation;
Ukhalina I.A. – establishing the relationship between the content of the problem and existing techniques for overcoming them;
Antsibor A.V. – compilation of a list of indicators for the balanced scorecard;
Efimenko N.A. – building a strategic map based on the balanced scorecard;
Rogacheva Zh.S. – study, processing and systematization of publications on the problem under study.

FUNDING:

The study had no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Mariy V. Golovko, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Department of Institutional Economics and Investment Management, I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation.
 ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4835-9800>
 e-mail: golovko178@mail.ru

Андрей Михайлович Потявин, магистрант кафедры институциональной экономики и инвестиционного менеджмента, Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, г. Краснодар, Российская Федерация.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-0324-0206>

e-mail: potyavin99@mail.ru

Ирина Анатольевна Ухалина, к.э.н., доцент кафедры экономики и социально-гуманитарных дисциплин, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1928-7510>

e-mail: IAUkhalina@mephi.ru

Анна Васильевна Анцибор, к.э.н., доцент кафедры экономики и социально-гуманитарных дисциплин, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1192-4554>

e-mail: AVAntsibor@mephi.ru

Нина Алексеевна Ефименко, к.э.н., доцент кафедры экономики и социально-гуманитарных дисциплин, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8113-6759>

e-mail: NAEfimenko@mephi.ru

Жанна Сергеевна Рогачева, к.э.н., доцент кафедры экономики и социально-гуманитарных дисциплин, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3363-2691>

e-mail: ZSRogacheva@mephi.ru

Andrey M. Potyavin graduate student, Department of Institutional Economics and Investment Management, I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-0324-0206>

e-mail: potyavin99@mail.ru

Irina A. Ukhulina, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Economics, Social and Humanitarian Disciplines Volgodosk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodosk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1928-7510>

e-mail: IAUkhalina@mephi.ru

Anna V. Antsibor, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Economics and Social and Humanitarian Disciplines Volgodosk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodosk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1192-4554>

e-mail: AVAntsibor@mephi.ru

Nina A. Efimenko, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Economics and Social and Humanitarian Disciplines Volgodosk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodosk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8113-6759>

e-mail: NAEfimenko@mephi.ru

Zhanna S. Rogacheva, Cand. Sci. (Econ) Associate Professor, Department of Economics and Social and Humanitarian Disciplines Volgodosk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodosk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3363-2691>

e-mail: ZSRogacheva@mephi.ru

Поступила в редакцию 14.09.2023

После доработки 10.11.2023

Принята к публикации 16.11.2023

Received 14.09.2023

Revision 10.11.2023

Accepted 16.11.2023

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Адаменков А.К.	46	Михайлов М.Ю.	11
Анцибор А.В.	71	Подрезов Н.Н.	22
Бондаренко В.А.	60	Попов А.А.	60
Бурдаков С.М.	27	Попова И.Ю.	51
Веселова И.Н.	46	Попова Т.С.	60
Виннийчук В.А.	22	Потявин А.М.	71
Головко М.В.	71	Ратушный В.И.	27
Доронин Ю.В.	22	Рачков В.И.	5
Евдошкина Ю.А.	60	Рогачева Ж.С.	71
Елохин А.П.	32	Руденко В.А.	60
Ефименко Н.А.	71	Савельев А.А.	5
Зайнутдинова Л.Х.	11	Старченко А.С.	51
Заяров Ю.В.	27	Теруков Е.И.	11
Ильичев В.Г.	11	Тришечкин Д.В.	51
Лапкис А.А.	51	Ухалина И.А.	71

AUTHOR INDEX

Adamenkov A.K.	46	Popova T.S.	60
Antsibor A.V.	71	Potyvin A.M.	71
Bondarenko V.A.	60	Rachkov V.I.	5
Burdakov S.M.	27	Rarushny V.I.	27
Doronin Yu.V.	22	Rogacheva Zh.S.	71
Efimenko N.A.	71	Rudenko V.A.	60
Elokhin A.P.	97	Savelev A.A.	5
Evdoshkina Yu.A.	60	Starchenko A.S.	51
Golovko M.V.	71	Terukov E.I.	11
Ilyichev V.G.	11	Trishechkin D.V.	51
Lapkis A.A.	51	Ukhalina I.A.	71
Mikhailov M.Yu.	11	Veselova I.N.	46
Podrezov N.N.	22	Vinnichuk V.A.	22
Popov A.A.	60	Zayarov Yu.V.	27
Popova I.Yu.	51	Zaynutdinova L.Kh.	11

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

(!) Обращаем внимание авторов: обновлены требования к оформлению статей с целью расширения международной аудитории журнала.

Полный текст статьи для опубликования должен быть оригинальным – не более 20% заимствований, сопровождаться экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати, соответствовать приведенным ниже правилам оформления.

В одном файле помещается одна статья, частями которой являются:

- индекс УДК;
- название на русском и английском языках;
- инициалы и фамилия авторов на русском и английском языках;
- аффилиация для каждого автора на русском и английском языках;
- структурированная по IMRAD аннотация (200-250 слов) на русском и английском языках;
- ключевые слова (не менее 10-и речевых единиц) на русском и английском языках;
- текст статьи;
- объединенный Список литературы / References (см. пример оформления);
- сведения об авторах (для каждого автора – Фамилия Имя Отчество, место/а работы, должность/и, ученая степень, звание, электронный адрес, индекс ORCID (<http://orcid.org>), телефон контактного автора) на русском и английском языках.

Статья должна быть структурирована: введение (актуальность темы; обзор проблемы; цель работы); методология (теория вопроса; подробное изложение методики проведения опытов; описание материалов и методов анализа; статистическая обработка); результаты и их обсуждение; заключение (выводы). Цель и ключевые результаты работы должны быть понятно представлены в аннотации и тексте статьи, научная новизна работы обоснована во введении со ссылкой на источники, опубликованные в научных рецензируемых изданиях (в том числе зарубежных) последних нескольких лет. Для статей производственного характера достаточно описать цель работы и полученные результаты.

Для записи формул рекомендуется применять редактор Equation 3.0. Все формулы выравниваются по центру страницы, нумеруются в круглых скобках по правому краю и упоминаются в тексте статьи непосредственно перед самими формулами.

Включение таблиц в статью должно быть целесообразным, сопровождаться нумерацией, заголовками на русском и английском языках (10 пт) и ссылками в тексте непосредственно перед самими таблицами.

Рисунки должны быть четкими, с нумерацией, подписями на русском и английском языках (10 пт), иметь ссылки в тексте и сопровождаться обоснованиями и выводами.

Статья оформляется в Microsoft Office 97-2003 Word 7.0 через 1 интервал, шрифтом Times New Roman, размером 12 пт, без знаков принудительного переноса и дополнительных пробелов. Поля со всех сторон – 2 см. Желательный объем статьи – не более 15 страниц машинописного текста, включая таблицы и рисунки (не более 10-и), список литературы (количество источников определяется автором исходя из поставленной научно-исследовательской цели). Если в тексте менее 2500 знаков, статья может быть отклонена экспертами.

С целью повышения качества и объективности публикаций авторы призваны отражать в статьях передовой научный опыт России, стран СНГ и дальнего зарубежья по рассматриваемой проблематике. Объединенный список литературы / References приводится в конце статьи в порядке упоминания в тексте и оформляется в стиле Vancouver, но без сокращения названий журналов. Ссылки на иностранные источники даются на языке оригинала.

Не включаются в список литературы источники, которые никогда не будут проиндексированы в базах данных цитирования: ГОСТы, нормативные и законодательные акты, внутренние документы предприятий (доклады, отчеты, протоколы и т.д.), официальные сайты организаций, словари, справочники, учебники и т.д. Такие источники цитируются непосредственно в тексте или в постраничных сносках согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008 <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=173511> с указанием выходных данных и режима доступа, по которым их можно найти в Интернете. Доклады конференций могут быть включены в список литературы, если они доступны в Интернете, при этом указывается режим доступа и дата обращения.

Для соблюдения правил слепого рецензирования необходимо создать копию файла со статьей, удалить персональные данные, содержащиеся в тексте файла и его свойствах (в тексте статьи удалить имена авторов и наименования их мест работы, ссылки на работы авторов в списке литературы заменить на «Автор, год», информацию об авторах следует удалить из свойств документа), сохранить в формате pdf с названием «На рецензирование_Название/начало названия статьи...».

Для принятия статьи в номер журнала необходимо загрузить файл со статьей в формате Word на платформе elpub – <https://glonucsec.elpub.ru/jour/index> – и предоставить следующие материалы по электронной почте oni-viti@mephi.ru:

- согласие на обработку персональных данных;
- файл со статьей в формате Word;
- итоговый (после доработки) файл в формате pdf с подписью авторов;
- файл со статьей в формате pdf для слепого рецензирования;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати.

1. Киркин А.М., Курындин А.В., Синегрибов С.В. и др. Проблема моделирования геометрии крестообразных витых твэлов при проведении теплогидравлических расчетов. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(1):23–35. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-03>
2. Kulamer B., Meester W., Salk Ju. Recommended practices to ensure technical conference content quality. *Science Editor and Publisher*. 2017;2(1):47–51. <https://doi.org/10.24069/2542-0267-2017-1-1-12>
3. Stevens M.R., Park K., Tian G. et al. Why do some articles in planning journals get cited more than others? *Journal of Planning Education and Research*. 2022;42(3):442–463. <https://doi.org/10.1177/0739456X19827083>
4. Small H., Boyack K. W., Klavans R. Citations and certainty: a new interpretation of citation counts. *Scientometrics*. 2019;118(2):1079–1092. <https://doi.org/10.1007/s11192-019-03016-z>
5. Barie E.Z., Chang C. Application of variable frequency drive on the condensate pump motors of APR1400 nuclear power plants for energy savings. *Journal of International Council on Electrical Engineering*. 2018;8(1):179–189. <https://doi.org/10.1080/22348972.2018.1515691>
6. Рашитов П.А., Серегин Д.А., Аникин М.Д., Вершанский Е.А. Применение многоуровневых инверторов напряжения в распределенных устройствах продольной компенсации. *Вестник МЭИ*. 2021;3:58–66. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2021-3-58-66>
7. Пономаренко Г.Л., Румик А.П. Патент № 2675380 С1 Российская Федерация, МПК G21C 7/00. Способ маневрирования мощностью ядерного энергетического реактора типа ВВЭР и PWR. Заявка №2018117898 от 15.05.2018; опубл. 19.12.2018. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002675380_20181219_C1_RU/ (дата обращения: 26.11.2023).
8. Алвахеба А.И., Сурин В.И., Бекетов В.Г., Иванов О.В., Иванова Т.Е. Сравнительный анализ результатов радиографического и электрофизического неразрушающего контроля сварных соединений модельных образцов. В кн.: *Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM–2018): Труды XVIII Международной молодежной конференции*. Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; 2018. С. 179–180. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36979736_11029641.pdf (дата обращения: 06.03.2023). EDN: YXJYAH
9. Vrbanic I., Samanta P., Basic I. Risk importance measures in the design and operation of nuclear power plants. ASME Press; 2017. 141 p. <https://doi.org/10.1115/1.861394>
10. Surin V.I., Beketov V.G., Abu Ghazal A.A., Alwaheba A.I. Spectral analysis method of electrophysical non-destructive testing data. *Journal of Physics: Conference Series. Mathematical modeling and computational methods in problems of electromagnetism, electronics and physics of welding*. 2021;(2131):052061. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/5/052061>

Адрес редакции журнала:

347360, Россия, Ростовская область, г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94

Редакция журнала «Глобальная ядерная безопасность», opi-viti@terphi.ru

Выпускающий редактор: Лобковская Надежда Ивановна, +79281883628, NILobkovskaya@terphi.ru

NOTES FOR AUTHORS

(!) Please, pay attention: the article formatting requirements have been updated in order to expand the international readership of the journal since

The full text of the article to be published must be original – no more than 20% borrowings, it must be accompanied by an expert resolution on publication possibility in the open press, and it must comply with the following rules. One file consists of one paper which has the following:

- UDC index;
- the title in Russian and English;
- authors' initials and surnames in Russian and English;
- an affiliation in Russian and English for each author;
- the structured abstract (200-250 words) in Russian and English according to IMRAD;
- keywords in Russian and English (not less than 10 speech units);
- article text;
- Combined List of References / References (see example design);
- information about the authors in Russian and English (each author should provide a full name, a place of work, position/s, an academic degree, a rank, e-mail address, ORCID index (<http://orcid.org>), contact phone number).

The article should be structured: introduction (relevance of the topic; review of the problem; purpose of the work); methodology (issue theory; detailed description of experiment methodology; description of materials and methods of analysis; statistical processing); results and their discussion; conclusions. The objective and key results of the work should be clearly presented in the abstract and the text of the article, the scientific novelty of the work is justified in the introduction with reference to the sources published in scientific peer-reviewed publications (including foreign ones) in the last few years. It is enough to describe the objective of the work and the results obtained for articles of a production nature.

The Equation 3.0 editor is recommended when writing formulas. All formulas are aligned to the center of the page, numbered in parentheses on the right and referred to in the text of the article just ahead of the formulas.

Inclusion of tables in the article should be appropriate, they should be numbered and have headings in Russian and English (10 pf) and links in the text just ahead of the tables.

Figures should be clear, numbered, figure captions in Russian and English (10 pf), have links in the text and be accompanied by justifications and conclusions.

An article should be processed in the Microsoft Office 97-2003 Word 7.0 format, 12 point font Times New Roman; print – 1 interval. Without any signs of forced transfer and additional gaps. Page parameters: all sides are 2,5 cm. The volume of article is no more than 15 pages of the typewritten text, including tables, drawings (no more than 10) and the list of references (the number of sources is determined by the author on the basis of the research objective). If the text of the article is less than 2500 type characters, the article may be rejected by experts.

In order to improve the quality and objectivity of publications, the authors are intended to reflect the advanced scientific experience of Russia, the CIS and foreign countries on the subject matter in the articles. The combined List of References is given at the end of the article in the order of mention in the text, in Vancouver style, but without abbreviating the names of the journals. References to foreign sources should be given in their original language.

Sources that will never be indexed in citation databases are not included in the reference list: State Standards, normative and legislative acts, internal documents of companies (reports, protocols, etc.), official websites of organisations, dictionaries, reference books, textbooks, etc. Such sources are cited directly in the text or in page footnotes according to State Standard R 7.0.5-2008 <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=173511> with indication of output data and URL where they can be found on the Internet. Conference papers may be included in the list of references if they are available on the Internet, indicating the URL and the date of reference.

To comply with the rules of blind peer review, a copy of the file with the article should be created, personal data contained in the text of the file and its properties should be deleted (authors' names and the names of their places of work in the text of the article should be deleted, references to authors' works in the list of references should be replaced by «Author, year», information about authors should be removed from the document properties), saved in pdf format with the title «To review_Title/start title of article...».

To be accepted into the journal issue, the article must be uploaded as a Word file on the elpub platform - <https://glonucsec.elpub.ru/jour/index> - and the following materials must be sent by email oni-viti@mephi.ru:

- consent to personal data processing;
- an article file in Word format;
- final (after revision) pdf file signed by the authors;
- a pdf file of the article for blind peer review;
- an expert analysis of publication possibility in the open press.

THE LIST OF REFERENCES STANDARD

1. Kirkin A.M., Kuryndin A.V., Sinegribov S.V. [et al.] The problem of modeling the geometry of Twisted Fuel Rods with X-type cross section in the performance of thermohydraulic calculations. *Global Nuclear Safety*. 2023;13(1):23–35 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-03>
2. Kulamer B., Meester W., Salk Ju., Recommended Practices to Ensure Technical Conference Content Quality. *Science Editor and Publisher*. 2017;2(1):47–51. <https://doi.org/10.24069/2542-0267-2017-1-1-12>
3. Stevens M.R., Park K., Tian G. et al. Why Do Some Articles in Planning Journals Get Cited More than Others? *Journal of Planning Education and Research*. 2022;42(3):442–463. <https://doi.org/10.1177/0739456X19827083>
4. Small H., Boyack K. W., Klavans R. Citations and certainty: a new interpretation of citation counts. *Scientometrics*. 2019;118(2):1079–1092. <https://doi.org/10.1007/s11192-019-03016-z>
5. Barie E. Z., Chang C. Application of variable frequency drive on the condensate pump motors of APR1400 nuclear power plants for energy savings. *Journal of International Council on Electrical Engineering*. 2018;8(1):179–189. <https://doi.org/10.1080/22348972.2018.1515691>
6. Rashitov P.A., Seregin D.A., Anikin M.D., Vershanskiy E.A. Application of multilevel voltage inverters in distributed series compensation devices. *Bulletin MPEI*. 2021;3:58–66 (In Russ.) <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2021-3-58-66>
7. Surin V.I., Beketov V.G., Abu Ghazal A.A., Alwaheba A.I. Spectral analysis method of electrophysical non-destructive testing data. *Journal of Physics: Conference Series. Mathematical modeling and computational methods in problems of electromagnetism, electronics and physics of welding*. 2021;(2131):052061 (In Russ.) <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/5/052061>
8. Erd A., Stokłosa J. Main design guidelines for battery management systems for traction purposes. *Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference Automotive Safety*. 2018. Slovakia. <https://doi.org/10.1109/AUTOSAFE.2018.8373345>
9. Chernov E.V. Development and application of WWER1000 PC based simulators for education and training in NRNU MEPhI. *Developing a systematic education and training approach using personal computer based simulators for nuclear power programmes proceedings of a technical meeting*. Vienna. 15–19 May. 2017:96–98. Available at: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE1836web.pdf> (accessed: 10.05.2023).
10. Golyandina N., Zhigljavsky A. Singular spectrum analysis for time series. SpringerBriefs in Statistics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin. Heidelberg, 2020. ISBN 978-3-662-62435-7. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-62436-4> (accessed: 19.05.2023).

Editorial office address (for sending printed correspondence):

347360, Russia, Rostov region, Volgodonsk, Lenin Street, 73/94

Editorial office of «Global Nuclear Safety» journal, oni-viti@mephi.ru

Executive Editor: Nadezhda I. Lobkovskaya, +79281883628, NILobkovskaya@mephi.ru
