

- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)  
2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки),  
2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность (технические науки),  
5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономические науки)

**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

**Выпускающий редактор:**

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

**Редакционная коллегия:**

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

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

**Валентин Ефимович Шукшунов**, 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 Гоок**, PhD в области техн. наук, Институт производственных систем и технологий конструирования ИПК Общества Фраунгофера, Германия

**Юлий Львович Чигиринский**, доктор техн. наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет, Российская Федерация

**Александр Евгеньевич Зверовщиков**, доктор техн. наук, доцент, Пензенский государственный университет, Российская Федерация

**Александр Рональдович Ингеманссон**, доктор техн. наук, АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады», Российская Федерация

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

**Наталья Дмитриевна Родионова**, доктор экон. наук, Ростовский государственный экономический университет (РИНХ), 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

**Компьютерная верстка:**

**Ольга Юревна Васильева**, инженер издательско-полиграфического сектора, ВИТИ 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», г. Москва, Российская Федерация
Типография	ВИТИ НИЯУ МИФИ, 347360, Россия, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94
Адрес учредителя и издателя	115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31
Сайт	<a href="https://glonucsec.elpub.ru">https://glonucsec.elpub.ru</a>
Тираж	100 экз.
Распространение	Распространяется бесплатно
Дата выхода в свет:	15.06.2026
Знаком информационной продукции не маркируется	



National Research Nuclear University MEPhI

# Nuclear Safety

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

Vol. 16, No. 2, 2026

**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

**Executive Editor:**

**Nadezhda I. Lobkovskaya**, Cand. Sci. (Philos.), 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

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

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

**Abdel-Monem Mohamed El-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

**Yuliy L. Chigirinsky**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Volgograd State Technical University, Russian Federation

**Alexander E. Zverovshchikov**, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor Penza State University, Russian Federation

**Alexander R. Ingemansson**, Dr. Sci. (Eng.), JSC FNPC «Titan-Barricades», Russian Federation

**Mariya V. Golovko**, Dr. Sci. (Econ.), Kuban SAU, Russian Federation

**Natalia D. Rodionova**, Dr. Sci. (Econ.), Rostov State University of Economics (RINH), 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

**Computer layout:**

**Olga Yu. Vasileva**, Engineer of Publishing and Printing Sector, VETI NRNU MEPhI, Russian Federation

Founded in November, 2011

Publication Frequency

Founder and Publisher

Editorial address

Printing house

Website

The circulation is

Subscription

Signed for printing:

It is not marked with an informational product sign

Reg. № FS77-47155, November, 3 2011

Quarterly

National Research Nuclear University MEPhI

Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409, Russian Federation

VETI NRNU MEPhI, Lenin Street, 73/94, Rostov region, Volgodonsk, 347360, Russian Federation

<https://glonucsec.elpub.ru>

100 copies

Free distribution

15.06.2026



Moscow

National Research Nuclear University MEPhI, 2026

## СОДЕРЖАНИЕ

Том 16, № 2 (59), 2026

### ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<b>Эксплуатационные аспекты восстановления дебита технологических скважин уранодобывающих объектов методом химической декольматации в Республике Казахстан</b> <i>Д.В. Алексеенко, В.Д. Колычев</i> .....	5
<b>Радиационная обстановка и результаты мониторинга 30-км зоны Ростовской АЭС</b> <i>А.О. Серко, А.А. Лапкис</i> .....	16

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

<b>Применение наземного лазерного сканирования при пусконаладочных работах на АЭС: опыт и перспективы</b> <i>И.И. Зайкин, С.И. Рясный, К.В. Булахтин, А.В. Шугорев, Р.Ш. Валеев, Н.А. Карпенко</i> .....	27
<b>Исследование высокочастотного воздействия на свойства сварочной дуги</b> <i>Е.С. Бурдаков, С.М. Бурдаков, Н.Н. Подрезов, Ю.В. Заяров</i> .....	41
<b>Метод поверхностных моментов – новый способ решения уравнения переноса нейтронов с детальным описанием углового распределения</b> <i>А.А. Семенов, А.М. Субботин</i> .....	49

### ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

<b>Моделирование термодинамических процессов в системе основной охлаждающей воды энергоблока ВВЭР-1200</b> <i>Г.А. Башикиров, А.Д. Данилов, Н.В. Карандеева</i> .....	57
<b>Нейтронный анализ устойчивых к авариям материалов топливной оболочки реакторов ВВЭР-1200 с использованием кода SERPENT</b> <i>Анисур С.К. Рахман</i> .....	67
<b>Нейтронно-шумовые методы контроля поканальной скорости теплоносителя в активной зоне</b> <i>Г.В. Аркадов, М.Т. Слепов</i> .....	77

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

<b>Репутационный потенциал атомных моногородов как стратегический ресурс технологического лидерства</b> <i>Н.Ю. Лесных, А.А. Созинова, Н.К. Савельева, М.В. Макарова</i> .....	91
<b>Планирование и организация самостоятельного обучения иностранному языку работающих студентов технических вузов</b> <i>Н.В. Бунамес, И.А. Ухалина</i> .....	106
<b>Устойчивое достижение нулевого LTIFR и экономическая эффективность мер промышленной безопасности в металлургическом производстве на примере АО «Ульбинский металлургический завод»</b> <i>Т.Ш. Идрисов, М.В. Коптелов</i> .....	116

Авторский указатель номера 2 (59), 2026.....	127
--	-----

## CONTENTS

Vol. 16, No 2, 2026

---

### NUCLEAR, RADIATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY

<b>Operational aspects of restoring the flow rate of technological wells at uranium mining facilities through chemical decolmatation in the Republic of Kazakhstan</b> <i>D.V. Alekseenko, V.D. Kolychev</i> .....	5
<b>Radiation environment and monitoring results within the 30 km zone within of the Rostov NPP</b> <i>A.O. Serko, A.A. Lapkis</i> .....	16

---

### DESIGN, MANUFACTURING AND COMMISSIONING OF NUCLEAR INDUSTRY EQUIPMENT

<b>Application of terrestrial laser scanning in NPP commissioning works: experience and prospects</b> <i>I.I. Zaykin, S.I. Ryasny, K.V. Bulakhtin, A.V. Shchugorev, R.Sh. Valeev, N.A.Karpenko</i> .....	27
<b>Study of high frequency impact on welding arc properties</b> <i>E.S. Burdakov, S.M. Burdakov, N.N. Podrezov, Yu.V. Zayarov</i> .....	41
<b>The surface moments method: a new approach to solve the neutron transport equation with a detailed description of angular distribution</b> <i>A.A. Semenov, A.M. Subbotin</i> .....	49

---

### OPERATION OF FACILITIES NUCLEAR INDUSTRY

<b>Modeling of thermodynamic processes in the main cooling water system of the VVER-1200 power unit</b> <i>G.A. Bashkirov, A.D. Danilov, N.V. Karandeeva</i> .....	57
<b>Neutronic analysis of accident-tolerant fuel cladding materials for VVER-1200 reactors using the SERPENT code</b> <i>Anisur S.K. Rahman</i> .....	67
<b>Neutron noise control methods for channel-by-channel coolant flow rate in the core</b> <i>G.V. Arkadov, M.T. Slepov</i> .....	77

---

### SAFETY CULTURE AND SOCIO-ECONOMIC ASPECTS DEVELOPMENT PLACEMENT TERRITORIES NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

<b>The reputational potential of nuclear single-industry towns as a strategic resource for technological leadership</b> <i>N.Yu. Lesnykh, A.A. Sozinova, N.K. Savelyeva, M.V. Makarova</i> .....	91
<b>Planning and organising independent foreign language learning for working students at technical universities</b> <i>N.V. Bunames, I.A. Ukhalina</i> .....	106
<b>Sustained zero LTIFR and the economic effectiveness of industrial safety measures in metallurgical production at Ulba metallurgical plant JSC</b> <i>T.Sh. Idrisov, M.V. Koptelov</i> .....	116
Author Index of 2, 2026 .....	127

---

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-01>

УДК 622:621.039

EDN AVYODY

Оригинальная статья / Original paper



## Эксплуатационные аспекты восстановления дебита технологических скважин уранодобывающих объектов методом химической декольматации в Республике Казахстан

Алексеев Д.В.<sup>1</sup>✉, Колычев В.Д.<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>АО «Волковгеология», г. Алматы, Республика Казахстан

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «НИЯУ МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

✉ [adv20@mail.ru](mailto:adv20@mail.ru)


**Аннотация.** Статья посвящена анализу эксплуатационных аспектов восстановления дебита технологических скважин уранодобывающих объектов, разрабатываемых методом подземного скважинного выщелачивания (ПСВ), в условиях развития процессов химической и механической кольматации прифильтровой зоны. Актуальность исследования обусловлена тем, что снижение дебитов скважин приводит к нарушению проектных режимов эксплуатации ПСВ-блоков, увеличению сроков их отработки, росту расхода реагентов и эксплуатационных затрат, а также повышению технологических и экологических рисков при добыче урана. Объектом исследования являются технологические скважины уранодобывающих объектов атомной отрасли, эксплуатируемые в промышленном режиме методом ПСВ. Предмет исследования – эксплуатационные параметры скважин и методы восстановления их производительности в условиях кольматации прифильтровой зоны. Целью работы является обоснование и оценка практической эффективности химической декольматации как метода ремонтно-восстановительных работ, направленного на восстановление дебита и повышение устойчивости эксплуатационных режимов скважинного фонда. Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи: анализ эксплуатационных причин снижения дебита технологических скважин; оценка влияния кольматационных процессов на фильтрационные свойства прифильтровой зоны; обоснование выбора химической декольматации как метода восстановительных работ; экспериментальная оценка воздействия реагентной обработки на элементы конструкции скважин; анализ изменения дебита и устойчивости эксплуатационных показателей скважин до и после проведения обработок. В качестве методов исследования использованы лабораторные испытания, анализ и мониторинг производственных данных эксплуатации скважин, а также обобщение результатов опытно-промышленных испытаний на действующих уранодобывающих объектах. В качестве материалов исследования использованы данные производственного контроля, результаты лабораторных исследований и эксплуатационные показатели скважинного фонда. Полученные результаты показали, что применение химической декольматации обеспечивает восстановление фильтрационных свойств прифильтровой зоны, рост дебита скважин и повышение устойчивости гидродинамических режимов, что позволяет увеличить межремонтный период эксплуатации. Сделан вывод о целесообразности включения данного метода в регламентные ремонтно-восстановительные мероприятия при эксплуатации уранодобывающих объектов атомной отрасли.

**Ключевые слова:** уран, подземное скважинное выщелачивание, атомная отрасль, технологические скважины, эксплуатация скважин, дебит скважин, восстановление дебита, кольматация, декольматация, прифильтровая зона, фильтрационные свойства, гидродинамический режим, ремонтно-восстановительные работы, реагентная обработка, промышленная эксплуатация, эксплуатационная надежность, промышленная безопасность, эффективность эксплуатации

**Для цитирования:** Алексеев Д.В., Колычев В.Д. Эксплуатационные аспекты восстановления дебита технологических скважин уранодобывающих объектов методом химической декольматации в Республике Казахстан. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(2):5-15. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-01>

**For citation:** Alekseenko D.V., Kolychev V.D. Operational aspects of restoring the flow rate of technological wells at uranium mining facilities through chemical decolmatation in the Republic of Kazakhstan. *Nuclear Safety*. 2026;16(2):5-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-01>

## Operational aspects of restoring the flow rate of technological wells at uranium mining facilities through chemical decolmatation in the Republic of Kazakhstan

Dmitry V. Alekseenko.<sup>1</sup>✉, Vladimir D. Kolychev<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>*Volkovgeologiya JSC, Almaty, Republic of Kazakhstan*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University "MEPHI", Moscow, Russian Federation*

✉ [adv20@mail.ru](mailto:adv20@mail.ru)

**Abstract.** The article considers the analysis of operational aspects of restoring the flow rate of technological wells at uranium mining facilities developed using the in-situ recovery (ISR) method under conditions of progressing chemical and mechanical clogging of the near-wellbore zone. The relevance of the study is determined by the fact that a decrease in well flow rates leads to violations of the design operating regimes of ISR blocks, an increase in block development time, higher reagent consumption and operating costs, as well as an increase in technological and environmental risks associated with uranium production. The object of the study is technological wells of uranium mining facilities within the nuclear industry, operated in an industrial mode using the ISR method. The subject of the study comprises the operational parameters of wells and methods for restoring their productivity under conditions of near-wellbore zone clogging. The purpose of the study is to substantiate and evaluate the practical effectiveness of chemical decolmatation as a repair and rehabilitation method aimed at restoring well flow rates and improving the stability of operational regimes of the well stock. To achieve this purpose, the following research objectives are addressed: analysis of operational causes of flow rate decline in technological wells; assessment of the impact of clogging processes on the filtration properties of the near-filter zone; justification of the selection of chemical decolmatation as a restoration method; experimental evaluation of the effects of reagent treatment on well construction elements; analysis of changes in well flow rates and the stability of operational performance indicators before and after treatment. The research methods included laboratory testing, analysis and monitoring of production well operation data, as well as generalization of the results of pilot-scale and industrial trials conducted at operating uranium mining facilities. The research materials consist of production control data, laboratory test results, and operational indicators of the well stock. The results obtained demonstrate that the application of chemical decolmatation ensures the restoration of filtration properties of the near-wellbore zone, increases well flow rates, and enhances the stability of hydrodynamic operating regimes, thereby extending the inter-repair operating period. It is concluded that the inclusion of this method in standard repair and rehabilitation procedures for the operation of uranium mining facilities within the nuclear industry is expedient.

**Keywords:** uranium, in-situ recovery (ISR), nuclear industry, technological wells, well operation, well flow rate, flow rate restoration, clogging, decolmatation, near-wellbore zone, filtration properties, hydrodynamic regime, repair and rehabilitation works, reagent treatment, industrial operation, operational reliability, industrial safety, operational efficiency

### Введение

Уранодобывающая отрасль является важным элементом ядерного топливного цикла<sup>1</sup>. В Республике Казахстан базовой технологией добычи урана является подземное скважинное выщелачивание (ПСВ)<sup>2</sup> [1], эффективность которого во многом определяется надежной эксплуатацией технологических

скважин<sup>3</sup> [2] и соблюдением требований промышленной и экологической безопасности.

В процессе длительной эксплуатации ПСВ-блоков наблюдается снижение интенсивности добычи уранового сырья ввиду ухудшения эксплуатационно-технических и технологических параметров скважин, при этом одной из наиболее распространенных проблем становится снижение дебита технологических скважин из-за химической и механической кольматации прифилтровой

<sup>1</sup> OECDNEA, IAEA. Uranium 2022: resources, production and demand (Red Book). Paris: OECD Publishing, 2022. 560 p. Available at: [https://tdb.oecd-nea.org/jcms/pl\\_79960/uranium-2022-resourcesproduction-and-demand?details=true](https://tdb.oecd-nea.org/jcms/pl_79960/uranium-2022-resourcesproduction-and-demand?details=true) (accessed: 21.02.2026).

<sup>2</sup> World Nuclear Association (WNA). Global uranium production. London: WNA, 2024. Available at: <https://world-nuclear.org> (accessed: 21.02.2026)

<sup>3</sup> Orano Mining. Uranium mining technology using underground well leaching. Paris: Orano, 2021. 44 p. Available at: [https://cdn.orano.group/orano/docs/default-source/orano-doc/expertises/producteur-uranium/32p\\_dp\\_orano\\_mining.pdf?sfvrsn=33004738\\_10](https://cdn.orano.group/orano/docs/default-source/orano-doc/expertises/producteur-uranium/32p_dp_orano_mining.pdf?sfvrsn=33004738_10) (accessed: 21.02.2026).

зоны [3,4], вызывая нарушение проектных режимов, увеличивая сроки отработки блоков, расход реагентов и эксплуатационные затраты, повышая технологические и экологические риски [5].

Поддержание требований промышленной и экологической безопасности требует своевременных ремонтно-восстановительных мероприятий, однако стандартные механические методы обработки не всегда обеспечивают устойчивый эффект при высокой кольматации. В связи с этим в реальных эксплуатационных условиях возникает задача восстановления дебита технологических скважин уранодобывающих месторождений методом химической декольматации, позволяющей целенаправленно удалять кольматационные образования и восстанавливать фильтрационные свойства прифильтровой зоны [6], с учетом выполнения требований повышения эффективности использования объекта, устойчивости достигнутого эффекта и безопасности выполнения работ.

Оценка эксплуатационных аспектов восстановления дебита технологических скважин методом химической декольматации рассматривается в настоящей статье на основе результатов лабораторных исследований и опытно-промышленных испытаний в условиях промышленной эксплуатации урановых месторождений. Исследуются рудники «Инкай» (месторождение «Инкай») и «Каратау» (месторождение «Буденовское»), отнесенные к пластово-инфильтрационным песчаным и алевролитовым коллекторам с переменной глинистостью и карбонатностью [6]. Продуктивные пласты сложены кварцево-полевошпатовыми песчаниками с преобладанием кварца (50-70 % объема обломочного материала) и полевых шпатов (5-25 %), при содержании обломков кремнистых пород до 30 %. Поровый наполнитель представлен глинисто-алевритовым материалом (11-27 %), включающим каолинит (3-6 %), монтмориллонит (3-4 %) и гидрослюда (1-3 %). Содержание карбонатных минералов (кальцит, сидерит) составляет до 0,2-0,3 %, однако их реакционная способность в сернокислотной среде способствует образованию вторичных сульфатных фаз. Минеральный состав и наличие глинисто-

карбонатного цемента определяют склонность призабойной зоны к химической и механической кольматации при изменении фильтрационного режима и состава технологических растворов [6].

С целью разработки методов и выбора режимов восстановления дебита технологических скважин на рудниках месторождения принимались во внимание литологические характеристики пластов, вещественный состав пород и особенности взаимодействия реагентов с фильтрующими материалами, что позволило обосновать выбор реагентных составов для разрушения карбонатно-глинистых отложений без повреждения конструктивных элементов скважины [7]

В современных литературных источниках по проблематике анализа эксплуатационных аспектов восстановления дебита технологических скважин уранодобывающих объектов рассматриваются гидрогеологические условия, химические аспекты выщелачивания и факторы, влияющие на работу скважинного фонда. Отмечается, что химическая и механическая кольматация прифильтровой зоны ухудшает проницаемость призабойного пространства, повышает перепады давления и снижает эффективность массопереноса [8,9]. При этом практические вопросы оценки эффективности химической декольматации в промышленной эксплуатации, устойчивости эффекта и требований безопасности остаются недостаточно систематизированными, что определяет необходимость прикладных исследований.

Объектом исследования являются технологические скважины уранодобывающих объектов Республики Казахстан, эксплуатируемые в промышленном режиме методом подземного скважинного выщелачивания (ПСВ), включая откачные и закачные скважины в составе эксплуатационных ПСВ-блоков. Предмет исследования – эксплуатационные параметры технологических скважин уранодобывающих объектов, а также методы восстановления их производительности в условиях химической и механической кольматации прифильтровой зоны при подземном скважинном выщелачивании. Цель работы – обоснование и оценка практической эффективности химической

декольматации как метода восстановления дебита технологических скважин и повышения устойчивости их эксплуатационных режимов при подземном скважинном выщелачивании урана. Задачи исследования:

– проанализировать эксплуатационные причины снижения дебита технологических скважин уранодобывающих объектов при подземном скважинном выщелачивании;

– оценить влияние процессов химической и механической кольматации на фильтрационные свойства прифильтровой зоны скважин;

– обосновать выбор химической декольматации в качестве метода ремонтно-восстановительных работ для восстановления производительности скважин;

– провести экспериментальную и опытно-промышленную оценку воздействия реагентной обработки на эксплуатационные параметры технологических скважин;

– проанализировать изменение дебита и устойчивости эксплуатационных режимов скважин до и после проведения химической декольматации.

### Методология и методы исследования

Результаты опытно-промышленных работ по восстановлению дебита технологических скважин методом химической декольматации на уранодобывающих объектах Республики Казахстан (рудники «Инкай» и «Каратау») положены в основу аналитического сопоставления параметров дебита, представленного в настоящей статье. В рамках выполненных работ реагентной обработке подвергнуто более 30 технологических скважин на каждом руднике. В статье приведены результаты по репрезентативным фрагментам выборки (по 5 скважин на каждом объекте), позволяющим продемонстрировать характер изменения дебита и динамику восстановительного эффекта.

Контроль параметров дебита осуществлялся за 1 час до обработки, непосредственно после промывки и через 24 часа после завершения реагентной обработки. Дополнительно проводился мониторинг состояния обработанных скважин: по руднику «Инкай» – в течение 40–43 суток, по руднику «Каратау» – в течение 30 суток.

Анализ параметров дебита выполнялся с использованием электромагнитных расходомеров путем измерения объемов откачки за фиксированный интервал времени (60 минут) с одновременным учетом параметров давления и режимов работы насосного оборудования.

Оценка эффективности обработки проводилась на основании изменения дебита и устойчивости достигнутого эффекта в контрольный период наблюдения. Эффект считался устойчивым при сохранении увеличенного дебита с отклонением не более  $\pm 10\%$  от достигнутого значения в течение всего периода мониторинга.

В лабораторных условиях на основе анализа минералогического состава продуктивных пород и характера кольматационных образований был подобран оптимальный реагентный состав [2,9], включающий растворы бифторида аммония (БФА) в сочетании с серной кислотой и поверхностно-активными веществами (сульфонол) [4,10]. Данный состав и применяли на опытно-промышленных испытаниях. Для ряда этапов использовались составы БФА  $16 \text{ г/дм}^3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 25 \text{ г/дм}^3$ , а также БФА  $16 \text{ г/дм}^3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 30 \text{ г/дм}^3 + \text{сульфонол } 0,5 \text{ г/дм}^3$ .

Обработка скважин на месторождениях выполнялась путем закачки раствора в объеме порядка  $4 \text{ м}^3$  с выдержкой 24 часа, последующей прокачкой (промывкой) порядка  $40 \text{ м}^3$  и контрольным замером дебита.

В лабораторных условиях проводилась дополнительная оценка совместимости реагентов с конструкционными материалами скважин (кислотоустойчивый гравий, ПВХ, полистирол), при этом признаков разрушения указанных компонентов выявлено не было.

Для оценки изменения фильтрационных характеристик прифильтровой зоны использовался относительный коэффициент восстановления проницаемости:  $K_{\text{восст}} = Q_{\text{после}} / Q_{\text{до}}$ , где  $Q_{\text{до}}$  – дебит до обработки,  $Q_{\text{после}}$  – дебит через 24 часа после обработки. Полученные значения  $K_{\text{восст}}$  варьировались в следующих диапазонах:

– для рудника «Инкай»: от 1,4 до 7,5;

– для рудника «Каратау»: от 3,7 до 27,5.

### **Эксплуатационные проблемы технологических скважин при ПСВ**

Снижение дебита технологических скважин при ПСВ обусловлено комплексом физико-химических процессов, протекающих в призабойной зоне пласта в условиях длительного воздействия серноокислотных выщелачивающих растворов [8]. По данным производственных наблюдений и опытно-промышленных работ, выполненных авторами на рудниках «Инкай» и «Каратау», в процессе эксплуатации дебит отдельных скважин может снижаться на 10-20 %, что сопровождается уменьшением фильтрационной проводимости призабойной зоны в среднем на 20-30 %. Ключевым механизмом является развитие процессов химической и механической коагуляции [9,10].

Химическая коагуляция связана с образованием вторичных минеральных фаз – продуктов взаимодействия выщелачивающих растворов с породами коллектора и компонентами пластовых вод. В условиях серноокислотного выщелачивания возможно выпадение сульфатных и гидроксидных соединений железа, алюминия и кальция, а также перекристаллизация карбонатных цементов, что приводит к снижению эффективной проницаемости порового пространства.

Механическая коагуляция обусловлена миграцией глинистых и тонкодисперсных частиц (до 25 % глинистого материала в составе коллектора), которые при изменении фильтрационного режима перемещаются в зону фильтра и прифильтровое пространство. Закупоривание пор и фильтровых отверстий вызывает локальное увеличение гидравлического сопротивления и рост перепадов давления.

Следствием указанных процессов становится не только снижение производительности отдельных скважин, но и нарушение устойчивости гидродинамических режимов ПСВ-блоков: перераспределение потоков по наименее сопротивляющимся каналам, формирование зон пониженного массопереноса и локальная неравномерность продвижения фронта выщелачивания [8]. В совокупности это повышает чувствительность системы к режимным колебаниям и усложняет под-

держание проектных параметров эксплуатации, что обуславливает необходимость применения методов восстановительного воздействия на призабойную зону [10].

### **Химическая декоагуляция как метод восстановления дебита технологических скважин**

Химическая декоагуляция относится к методам реагентного воздействия на призабойную зону пласта, направленным на устранение факторов, ограничивающих фильтрационную проводимость и гидродинамическую связь «пласт–скважина». В условиях ПСВ данный метод рассматривается как элемент регламентированных ремонтно-восстановительных мероприятий, применяемых при выявлении устойчивого снижения дебита, не связанного с изменением технологических режимов нагнетания и отбора [9,10].

В отличие от механических способов очистки, реагентное воздействие обеспечивает проникновение активных компонентов в зону фильтрации и воздействие на коагуляционные образования различной природы. Это позволяет воздействовать не только на поверхностные отложения в зоне фильтра, но и на более глубокие участки прифильтрового пространства, где формируются вторичные минеральные осадки и зоны повышенного гидравлического сопротивления.

Механизм восстановительного эффекта обусловлен совокупностью физико-химических процессов, включающих растворение карбонатных и глинистых компонентов цемента, деструкцию вторичных сульфатных фаз и частичную стабилизацию дисперсных частиц. В результате обработки происходит увеличение эффективного сечения фильтрационных каналов и снижение сопротивления движению растворов. Последующая прокачка обеспечивает удаление продуктов реакции и мобилизованного дисперсного материала из зоны фильтрации, что способствует закреплению достигнутого эффекта.

Следует отметить, что эффективность химической декоагуляции определяется не только составом реагентной композиции, но и соответствием параметров обработки

геолого-фильтрационным характеристикам конкретного пласта. Несоответствие режима воздействия свойствам коллектора может привести к локальному перераспределению потоков без выраженного восстановления дебита. Поэтому реагентная обработка рассматривается как управляемый технологический процесс, требующий учета литологического состава, степени кольтации и текущих эксплуатационных условий.

Таким образом, химическая декольтация представляет собой не разовую операцию очистки, а технологический инструмент регулирования фильтрационной проводимости призабойной зоны, направленный на восстановление эксплуатационных параметров скважин и стабилизацию работы ПСВ-блоков [9].

### Результаты исследования

Проведенные лабораторные и опытно-промышленные работы позволили количественно оценить эффект химической декольтации на изменение дебита технологических скважин в условиях промышленной эксплуатации ПСВ-блоков.

По результатам обработок на рудниках «Инкай» и «Каратау» зафиксировано устойчивое увеличение дебита скважин через 24 часа после проведения реагентной обработки. Полученные данные свидетельствуют о восстановлении фильтрационной проводимости призабойной зоны и снижении гидравлического сопротивления в прифильтровом пространстве.

Дальнейший анализ проводился на основании сопоставления параметров дебита до обработки, непосредственно после промывки и в контрольный период наблюдения.

### Статистическая характеристика эффекта

Проведенный в рамках настоящего исследования статистический анализ коэффициента восстановления проницаемости на примере рудного месторождения «Инкай» позволяет представить следующие оценочные параметры получаемого эффекта:

- средний коэффициент восстановления дебита составил  $K_{\text{восст}}=2,3$ ;
- диапазон разброса значений: 1,4–7,5;
- медианное значение: около 2,0;

– коэффициент вариации – умеренный, что свидетельствует о воспроизводимости эффекта.

Для рудного месторождения «Каратау» оценочные параметры получаемого эффекта представлены на следующем уровне:

- средний коэффициент восстановления дебита  $K_{\text{восст}}=5,6$ ;
- диапазон разброса значений: 3,7–27,5;
- медианное значение – ниже среднего, что указывает на наличие отдельных скважин с выраженным эффектом;
- коэффициент вариации выше по сравнению с месторождением «Инкай», что связано с большей неоднородностью литологического строения продуктивного пласта.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о статистически устойчивом характере прироста дебита при применении химической декольтации.

Повышенные значения коэффициента вариации для рудного месторождения «Каратау» объясняются большей неоднородностью фильтрационно-емкостных свойств продуктивного горизонта и различной степенью развития процессов кольтации в отдельных скважинах. При этом во всех случаях наблюдался положительный прирост дебита, что подтверждает системный характер воздействия реагентной обработки.

Дополнительно установлено, что применение химической декольтации позволяет сократить в среднем на 25% потребность в повторных ремонтно-восстановительных мероприятиях и способствует сокращению эксплуатационных затрат [2,4], связанных с поддержанием проектных режимов работы ПСВ-объектов. Полученные результаты, представленные в таблице 1 для рудника «Инкай» и в таблице 2 для рудника «Каратау», подтверждают практическую эффективность метода и его целесообразность для использования в составе регламентных мероприятий по эксплуатации уранодобывающих объектов атомной отрасли, включая элементы цифрового и операционного управления производственными процессами, направленные на повышение эффективности и устойчивости эксплуатации [11].

**Таблица 1.** Изменение дебита после химической декольматации на руднике «Инкай» (фрагмент ОПИ 5 скважин).

**Table 1.** Change in well flow rate after chemical decolmatation at the «Inkai» uranium mine (pilot-scale trial fragment, 5 wells)

№ п/п	Скважина	До обработки, м <sup>3</sup> /час	Через 24 часа, м <sup>3</sup> /час	Период контроля, сут
1	16-20-4 (откачная)	2,0	14,9	43
2	16-16-3 (откачная)	4,2	10,0	42
3	16-17-4 (закачная)	3,5	5,0	43
4	22-8-1 (откачная)	7,4	11,0	40
5	4-6-3а (откачная)	2,7	12,0	40

На рисунке 1 представлена визуализация динамики изменения дебита откачной скважины до использования бифторида аммония и после его применения на руднике «Инкай» (составлено авторами на основе данных опытно-промышленных работ).



**Рисунок 1.** Динамика дебита технологической скважины до и после химической декольматации на руднике «Инкай»

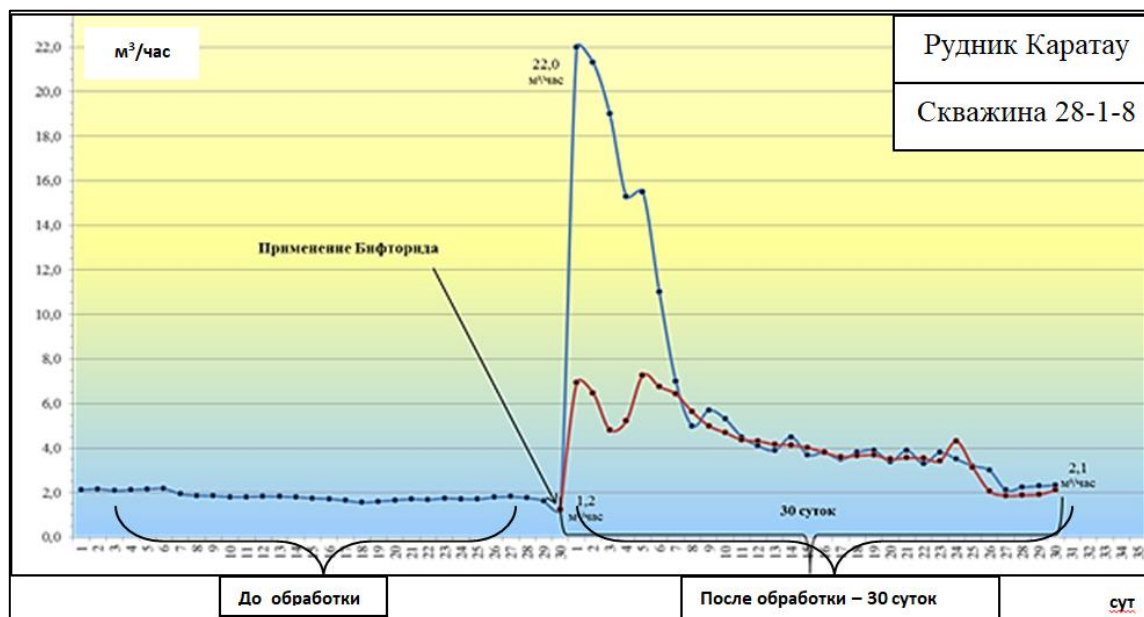
**Figure 1.** Dynamics of production well flow rate before and after chemical decolmatation at the «Inkai» uranium mine

**Таблица 2.** Изменение дебита после химической декольматации на руднике «Каратау» (фрагмент ОПИ 5 скважин)

**Table 2.** Change in well flow rate after chemical decolmatation at the «Karatau» uranium mine (pilot-scale trial fragment, 5 wells)

№ п/п	Скважина	До обработки, м <sup>3</sup> /час	Через 24 часа, м <sup>3</sup> /час	Период контроля, сут
1	28-1-8 (закачная)	1,2	22,0	30
2	28-1-9 (закачная)	1,4	13,5	30
3	28-3-5 (закачная)	1,5	16,5	30
4	28-3-6 (закачная)	0,8	20,1	30
5	43-4-4 (откачная)	3,6	20,0	30

На рисунке 2 представлена визуализация динамики изменения дебита откачной скважины до использования бифторида аммония и после его применения на руднике «Каратау» (составлено авторами на основе данных опытно-промышленных работ).

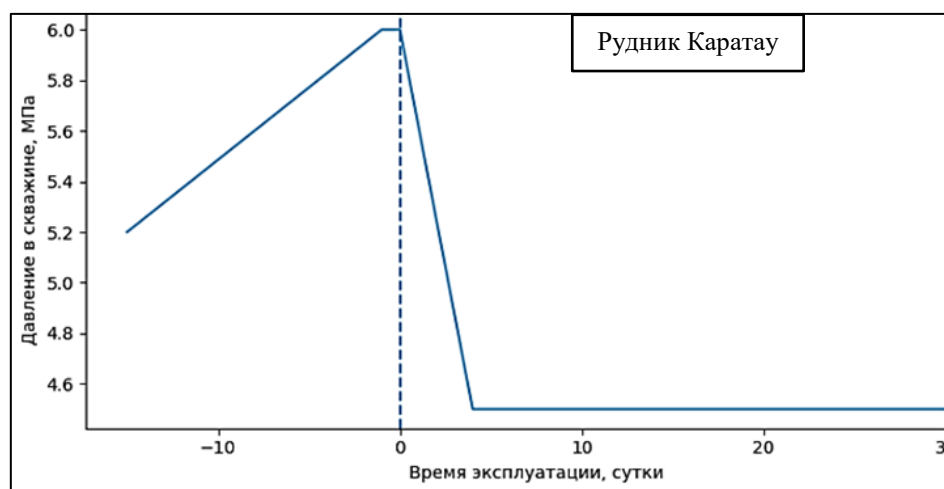


**Рисунок 2.** Динамика дебита технологической скважины до и после химической декольматации на руднике «Каратау»

**Figure 2.** Dynamics of production well flow rate before and after chemical decolmatation at the «Karatau» uranium mine

Анализ динамики изменения дебита технологических скважин на рудниках «Ин-кай» и «Каратау», (рис. 1 и 2 соответственно) показывает, что после проведения химической декольматации достигается восстановление дебита до устойчивого эксплуатационного уровня с последующей стабилизацией режима работы скважины. Полученный эффект свидетельствует о восстановлении фильтрационных свойств прифилтровой зоны и повышении устойчивости гидродинамических режимов эксплуатации [8,10].

Анализ динамики изменения давления в технологической скважине, представленный на рисунке 3 (составлено авторами на основе данных опытно-промышленных работ), показывает, что проведение химической декольматации приводит к снижению и стабилизации давления в призабойной зоне. Полученный эффект свидетельствует о снижении гидравлических сопротивлений, восстановлении фильтрационных свойств прифилтровой зоны и повышении устойчивости эксплуатационных режимов.



**Рисунок 3.** Динамика изменения давления в технологической скважине до и после химической декольматации на руднике «Каратау»

**Figure 3.** Pressure dynamics changes in a technological well before and after chemical decolmatation at the «Karatau» uranium mine

В целом полученные данные позволяют рассматривать химическую декольматацию как управляемый технологический инструмент регулирования фильтрационной проводимости призабойной зоны, а не как разовую операцию по устранению локальных отложений.

### **Обсуждение результатов**

Полученные в ходе исследования результаты подтверждают, что снижение дебита технологических скважин при подземном скважинном выщелачивании урана является системной эксплуатационной проблемой, обусловленной совокупным воздействием химических, гидродинамических и механических факторов. Анализ эксплуатационных данных показал, что развитие процессов кольматации прифильтровой зоны приводит не только к локальному ухудшению фильтрационных свойств призабойного пространства, но и оказывает комплексное влияние на устойчивость гидродинамических режимов ПСВ-блоков в целом.

Сопоставление результатов опытно-промышленных испытаний с данными, представленными в научной литературе, свидетельствует о том, что применение химической декольматации позволяет устранить ключевые причины снижения дебита, на которые традиционные механические методы ремонтно-восстановительных работ оказывают ограниченное воздействие. В отличие от стандартных способов очистки, химическая декольматация обеспечивает более равномерное восстановление проницаемости прифильтровой зоны и способствует стабилизации потоков выщелачивающих растворов [10,12].

### **Ограничения исследования**

Следует отметить, что исследование выполнено в условиях конкретных литолого-гидрогеологических характеристик место-

рождений «Инкай» и «Буденовское» [6]. Полученные результаты отражают эффективность метода в песчано-алевролитовых коллекторах с карбонатно-глинистым цементом и не могут быть напрямую экстраполированы на месторождения с иным минералогическим составом.

Дополнительные исследования целесообразно направить на оценку долговременного эффекта (свыше 3–6 месяцев) и количественную оценку влияния декольматации на извлечение урана из блока в целом.

### **Заключение**

Установлено, что снижение дебита технологических скважин при ПСВ обусловлено развитием химической и механической кольматации прифильтровой зоны, приводящей к росту гидравлических сопротивлений и нарушению проектных режимов работы ПСВ-блоков.

Применение реагентных составов на основе бифторида аммония в сочетании с серной кислотой и ПАВ обеспечивает восстановление фильтрационных свойств призабойной зоны без негативного воздействия на конструкционные материалы скважин.

В результате опытно-промышленных работ зафиксировано статистически устойчивое увеличение дебита:

- рудник Инкай – в среднем в 2,3 раза;
- рудник Каратау – в среднем в 5,6 раза.

Технологический эффект сохранялся в течение 30–43 суток наблюдения, что свидетельствует о стабилизации гидродинамических режимов ПСВ-блоков.

Полученные результаты согласуются с ранее разработанными подходами к оценке эффективности проектов интенсификации ПСВ-добычи, представленными в [12], что подтверждает применимость предложенного метода как с технологической, так и с экономической точки зрения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Oryngozhin Ye.S.O., Eremin N.A., Metaksa G.P., Alisheva Zh.N. Underground uranium borehole leaching. *News of the National academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences*. 2020;4;442:62-69. <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.85>
2. Исманова К.Д., Дедаханов А.О., Мадалиев Х.Б. Физико-химические основы технологического процесса подземное выщелачивание. *Экономика и социум*. 2022;5-1(96):491-494. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/fiziko-himicheskie-osnovy-tehnologicheskogo-protsesta-podzemnoe-vyschelachivanie/viewer> (дата обращения: 21.11.2025).  
Ismanova K.D., Dedakhanov A.O., Madaliev Kh.B. Physical and chemical foundations of the underground leaching process. *Economics and Sociology*. 2022;5-1(96):491-494. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/fiziko-himicheskie-osnovy-tehnologicheskogo-protsesta-podzemnoe-vyschelachivanie/viewer> (accessed: 21.11.2025).
3. Рассказов И.Ю., Секисов А.Г., Рассказова А.В. Подземное выщелачивание молибдена и урана с использованием перкарбонатных и хлоридно-гипохлоритных растворов. *Записки Горного института*. 2022;256:623-631. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.60>  
Rasskazov I.Yu., Sekisov A.G., Rasskazova A.V. Underground leaching of molybdenum and uranium using percarbonate and chloride-hypochlorite solutions. *Notes of the Mining Institute*. 2022;256:623-631. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.60>
4. Ракишев Б.Р., Язиков Е.Г., Матаев М.М., Кенжетаев Ж.С. Выщелачивание урана из материала керновых проб в трубках с применением окислителя. *Горный журнал*. 2021;9:84-89. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.09.14>  
Rakishev B.R., Yazikov E.G., Matayev M.M., Kenzhetaev Zh.S. Leaching of uranium from core samples in tubes using an oxidizing agent. *Mining Journal*. 2021;9:84-89. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.09.14>
5. Поляков Н.А., Хандуева В.Д. Сквжинное подземное выщелачивание как метод добычи экологически безопасного урана. В сборнике: Наука, технологии и безопасность в XXI веке (инженерные науки). Материалы Региональной научно-практической студенческой конференции. Улан-Удэ, 2024. С. 55-58. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80316453> (дата обращения: 01.12.2025).  
Polyakov N.A., Khandueva V.D. Well-based underground leaching as a method of extracting environmentally friendly uranium. In the collection: Science, technology, and security in the 21st century (engineering sciences). Materials of the regional scientific and practical student conference. Ulan-Ude, 2024. P. 55-58. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=80316453> (accessed: 01.12.2025).
6. Яшин С.А. Подземное сквжинное выщелачивание урана на месторождениях Казахстана. *Горный журнал*. 2008;3:45-49. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=10019277> (дата обращения 01.12.2025).  
Yashin S.A. Underground well-logging of uranium at deposits of Kazakhstan. *Mining Journal*. 2008;3:45-49. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=10019277> (accessed: 01.12.2025).
7. Панов Ю.П., Брюховецкий О.С., Секисов А.Г. К вопросу применения новых физико-химических геотехнологий освоения месторождений урановых руд. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2023;65;1:8-14. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-1-8-14>  
Panov Yu.P., Bryukhovetsky O.S., Sekisov A.G. On the application of new physical and chemical geotechnologies for the development of uranium Ore deposits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*. 2023;65;1:8-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-1-8-14>
8. Овсейчук А.М., Зозуля В.А. Моделирование процессов фильтрации технологических растворов при блочном подземном выщелачивании. *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2021;27;4:13-19. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2021-27-4-13-19>  
Ovseichuk A.M., Zozulya V.A. Modeling of technological solutions filtration processes during block underground leaching. *Bulletin of Transbaikal state university*. 2021;27(4):13-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2021-27-4-13-19>
9. Зозуля А.М., Овсейчук В.А. Повышение эффективности подземного выщелачивания за счет снижения технологических потерь урана. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;3-1:17-25. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46109685> (дата обращения 02.12.2025).  
Zozulya A.M., Ovseichuk V.A. Improving the efficiency of underground leaching by reducing technological losses of uranium. *Mining informational and analytical bulletin*. 2021;3-1:17-25. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46109685> (accessed: 21.11.2025).
10. Юсупов Х.А., Абен Е.Х., Омиргали А.К., Хайруллаев Н. Исследование изменения активности выщелачивающего раствора во времени после обработки кавитатором. *Новости науки Казахстана*. 2021;1 (148):61-68. [https://doi.org/10.53939/15605655\\_2021\\_1\\_100](https://doi.org/10.53939/15605655_2021_1_100)  
Yusupov Kh.A., Aben E.Kh., Omirgali A.K., Khairullaev N. Research of the change in the activity of the leaching solution in time after treatment with a cavitator. *News of science of Kazakhstan*. 2021;1 (148):61-68. (In Russ.). [https://doi.org/10.53939/15605655\\_2021\\_1\\_100](https://doi.org/10.53939/15605655_2021_1_100)
11. Колычев В.Д., Белкин И.О. Интеграция бережливого производства и цифровых технологий в управление операционной деятельностью промышленных предприятий. *Известия высших учебных заведений. Серия:*

*Экономика, финансы и управление производством.* 2023;3(57):45-58. Режим доступа: <https://ecofin-isuct.ru/article/view/5209> (дата обращения 02.12.2025).

Kolychev V.D., Belkin I.O. Integration of lean production and digital technologies into the management of industrial enterprises' operational activities. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Series: Economics, finance and production management.* 2023;3(57):45-58. (In Russ.). Available at: <https://ecofin-isuct.ru/article/view/5209> (accessed: 02.12.2025).

12. Алексеевко Д.В., Колычев В.Д. Комплексная методика оценки эффективности инвестиционных проектов интенсификации подземного скважинного выщелачивания урана в условиях цифровизации: опыт республики Казахстан. *Вестник Забайкальского государственного университета.* 2026;(32):121-135. DOI: 10.21209/2227-9245-2026-32-1-121-135

Alekseenko D.V., Kolychev V.D. A comprehensive methodology for evaluating the efficiency of investment projects for intensifying in-situ uranium leaching under digitalization conditions: the experience of the Republic of Kazakhstan. *Bulletin of Transbaikal State University.* 2026;(32):121-135. (In Russ.). DOI: 10.21209/2227-9245-2026-32-1-121-135

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Алексеевко Д.В.** – формирование концепции исследования, постановка цели и задач работы, анализ эксплуатационных данных, обобщение результатов лабораторных и опытно-промышленных исследований, подготовка и написание основного текста статьи;

**Колычев В.Д.** – научное руководство исследованием, участие в формировании методологической базы, интерпретация полученных результатов, научное редактирование текста статьи и согласование выводов.

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Alekseenko D.V.** – development of the research concept, formulation of the study objectives and tasks, analysis of operational data, synthesis of laboratory and pilot-scale industrial results, and preparation and writing of the main text of the article;

**Kolychev V.D.** – scientific supervision of the study, participation in the development of the methodological framework, interpretation of the obtained results, scientific editing of the article text, and validation of the conclusions.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

#### FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

#### CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Дмитрий Викторович Алексеевко**, начальник Управления трансформации и новых проектов АО «Волковгеология», г. Алматы, Казахстан.  
e-mail: adv20@mail.ru

**Владимир Дмитриевич Колычев**, к.т.н., доцент кафедры финансового мониторинга института финансовых технологий и экономической безопасности Национального исследовательского ядерного университета «НИЯУ МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-8616-9354>

e-mail: kolychev@mephi.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Dmitry V. Alekseenko**, Head of the Department of Transformation and New Projects, Volkovgeologiya JSC, Almaty, Kazakhstan.  
e-mail: adv20@mail.ru

**Vladimir D. Kolychev**, Can. Sci. (Engin.), associate professor, Department of Financial Monitoring, Institute of Financial Technologies and Economic Security, National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-8616-9354>

e-mail: kolychev@mephi.ru

Поступила в редакцию / Received 17.12.2025

После доработки / Revision 12.05.2026

Принята к публикации / Accepted 15.05.2026

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И  
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ  
NUCLEAR, RADIATION AND  
ENVIRONMENTAL SAFETY

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-02>

УДК 628.5:621.039

EDN CFXVIF

Оригинальная статья / Original paper




Радиационная обстановка и результаты мониторинга  
30-км зоны Ростовской АЭС

А.О. Серко<sup>1</sup>  , А.А. Лапкис<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Федеральное медико-биологическое агентство (ФМБА России), г. Волгодонск, Ростовская обл.,  
Российская Федерация

<sup>2</sup>Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного  
университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация

 [mysi4ka90@mail.ru](mailto:mysi4ka90@mail.ru)



**Аннотация.** Актуальность исследования обусловлена необходимостью верификации данных радиационного мониторинга и объективной оценки радиационной безопасности населения в 30-км зоне наблюдения Ростовской АЭС (РоАЭС). Цель работы – анализ межгодовой динамики радиационной обстановки по результатам систематических измерений за период 2021-2025 гг. Объектами исследования выступали атмосферные выпадения, почва и поверхностные воды (водоем-охладитель РоАЭС и Цимлянское водохранилище) в контрольных пунктах г. Волгодонск и г. Цимлянск. Применялись методы гамма-спектрометрии и радиохимического анализа для определения суммарной  $\beta$ -активности и удельной активности техногенных ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{131}\text{I}$ ) и естественных ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ) радионуклидов. Статистическая обработка включала непараметрический критерий Манна-Кендалла, оценку наклона Сена, корреляционный анализ (Пирсон/Спирмен), парный тест Вилкоксона и кросс-корреляцию с временными лагами. Среднегодовые значения удельной активности радионуклидов в атмосферных выпадениях ( $\Sigma\beta$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) стабильно соответствовали фоновым диапазонам для европейской части России (43-47% от верхней границы регионального фона). Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в почве (1-6 Бк/кг) и воде (0,3-0,7 Бк/кг) не превышало уровней, обусловленных глобальными выпадениями, и находилось на 1-2 порядка ниже нормативов для питьевой воды. Статистический анализ не выявил значимых монотонных трендов ни по одному из контролируемых параметров (все  $p > 0,10$ ), а также значимых различий между пунктами наблюдения. Полученные данные свидетельствуют об отсутствии значимого техногенного вклада РоАЭС в радиационную обстановку зоны наблюдения. Впервые для данного региона представлен непрерывный пятилетний ряд измерений с применением современных методов непараметрической статистики, что позволяет перейти от описательного мониторинга к количественной оценке устойчивости радиационного фона.

**Ключевые слова:** радиационная обстановка, мониторинг, 30-км зона, Ростовская АЭС, атмосферные выпадения, почва, вода, Цимлянское водохранилище, цезий-137, экологическая безопасность

**Для цитирования:** Серко А.О., Лапкис А.А. Радиационная обстановка и результаты мониторинга 30-км зоны Ростовской АЭС. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(2):16-26. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-02>


**For citation:** Serko A.O., Lapkis A.A. Radiation environment and monitoring results within the 30 km zone of the Rostov NPP. *Nuclear Safety*. (In Russ.). 2026;16(2):16-26. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-02>

Radiation environment and monitoring results within the 30 km zone  
of the Rostov NPP

Alevtina O. Serko<sup>1</sup>  , Alexander A. Lapkis<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Federal Medical and Biological Agency (FMBA of Russia), Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation

<sup>2</sup>Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,  
Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation

 [mysi4ka90@mail.ru](mailto:mysi4ka90@mail.ru)

**Abstract.** The relevance of this study is determined by the need to verify radiation monitoring data and to provide an objective assessment of radiation safety of the population residing within the 30-km surveillance zone of the Rostov Nuclear Power Plant (RoNPP). The objective is to analyze interannual dynamics of the radiation situation based on systematic measurements performed during 2021-2025. The study objects include atmospheric fallout, soil, and surface water (the RoNPP cooling pond and Tsimlyansk Reservoir) sampled at control points in Volgograd and Tsimlyansk. Gamma spectrometry and radiochemical analysis are applied to determine total  $\beta$ -activity and specific activity of technogenic ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{131}\text{I}$ ) and natural ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ) radionuclides. Statistical processing employs the non-parametric Mann-Kendall test, Sen's slope estimation, correlation analysis (Pearson/Spearman), paired Wilcoxon signed-rank test, and cross-correlation with temporal lags. Average annual values of radionuclide specific activity in atmospheric fallout ( $\Sigma\beta$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) consistently remain within background ranges typical for the European part of Russia (43-47% of the upper regional background boundary).  $^{137}\text{Cs}$  content in soil (1-6 Bq/kg) and water (0.3-0.7 Bq/kg) do not exceed levels attributable to global fallout and is 1-2 orders of magnitude below drinking water standards. Statistical analysis reveals no significant monotonic trends for any monitored parameter (all  $p > 0.10$ ) and no significant differences between sampling locations. In conclusion, the obtained data indicate the absence of a significant technogenic contribution from the RoNPP to the radiation situation in the surveillance zone. A continuous five-year measurement series is presented with application of modern non-parametric statistical methods for the first time in this region, enabling a transition from descriptive monitoring to quantitative assessment of radiation background stability.

**Keywords:** radiation environment, monitoring, 30 km zone, Rostov NPP, atmospheric fallout, soil, water, Tsimlyansk Reservoir, cesium-137, environmental safety

Оценка радиационного воздействия атомных электростанций на окружающую среду остается одной из ключевых задач ядерной безопасности на протяжении всего периода эксплуатации объектов. Необходимость систематического мониторинга обусловлена как требованиями действующего российского законодательства – Федерального закона от 09.01.1996 №3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» и норм радиационной безопасности НРБ-99/2009 (СанПиН 2.6.1.2523-09), – так и международными стандартами МАГАТЭ в области радиационной защиты<sup>1,2</sup>.

На территории Российской Федерации функционирует Единая государственная автоматизированная система мониторинга радиационной обстановки (ЕГАСМРО), объединяющая ведомственные и территориальные сети наблюдений и обеспечивающая информационную поддержку органов государственной власти в сфере радиационной безопасности. На всех АЭС России действуют автоматизированные системы контроля радиационной обстановки (АСКРО) серии «Атлант», интегрированные в отрас-

левую подсистему с центральным пультом в Кризисном центре АО «Концерн Росэнергоатом»<sup>3</sup>. Ключевая роль в независимой оценке состояния окружающей среды отведена лабораториям Федерального медико-биологического агентства (ФМБА России), в частности – ФГБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии №5» (г. Волгоград).

Международный опыт убедительно демонстрирует, что долгосрочный мониторинг является необходимым условием объективной оценки воздействия АЭС на экосистемы. Масштабное исследование, проведенное в районе расположения китайской АЭС «Цзиньшань» (Qinshan NPP) в течение девяти лет наблюдений (2012-2020 гг.), показало, что уровни радиоактивности в питьевой воде и накопленные дозы по данным термолюминесцентных дозиметров стабильно соответствовали природному фону, а годовые эффективные дозы облучения населения оставались ниже референтного уровня 0,1 мЗв/год [1]. Аналогичные выводы получены в исследовании радиационной обста-

<sup>1</sup> Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СанПиН 2.6.1.2523-09. М.: Роспотребнадзор, 2009.

<sup>2</sup> Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). СП 2.6.1.2612-10. М.: Роспотребнадзор, 2010.

<sup>3</sup> Росэнергоатом. Автоматизированные системы контроля радиационной обстановки (АСКРО) на АЭС России. Единая государственная автоматизированная система мониторинга радиационной обстановки (ЕГАСМРО). – Режим доступа: [https://www.rosenergoatom.ru/safety\\_environment/obespechenie-bezopasnosti/radiatsionnyy-kontrol/](https://www.rosenergoatom.ru/safety_environment/obespechenie-bezopasnosti/radiatsionnyy-kontrol/) (дата обращения: 15.01.2026).

новки в районе АЭС «Саньмэнь» (Sanmen NPP, Китай): статистический анализ поквартальных данных 30 мониторинговых пунктов за период 2014-2021 гг. не выявил значимого тренда роста накопленных доз, что авторы расценивают как подтверждение стабильности радиационной обстановки при нормальной эксплуатации реактора [2]. Задача оптимизации сетей радиационного мониторинга в районах расположения АЭС активно разрабатывается в зарубежной литературе: с использованием ансамблевого моделирования переноса радионуклидов и алгоритмов машинного обучения предложены новые стратегии оптимального размещения измерительных постов для повышения эффективности аварийного реагирования [3].

Радиационный мониторинг в районе расположения РоАЭС проводится систематически с 1999 года – еще до ввода в эксплуатацию первого энергоблока. В работе И.Г. Шумского и С.А. Романовой (2012) было показано, что при работе энергоблока №1 на мощности выше номинальной (104%) влияние газоаэрозольных выбросов РоАЭС на объемную активность радионуклидов в приземном слое воздуха и атмосферных выпадениях отсутствовало, а мощность дозы гамма-излучения находилась в пределах фона региона (0,08-0,11 мкЗв/час) [4]. Методом биоиндикации (*Allium* сера) Е.И. Шиманская с соавторами (2013) выявили отдельные участки с повышенной генотоксичностью почвы в 30-км зоне, связанные не с деятельностью АЭС, а с сельскохозяйственными предприятиями [5]. Независимые радиоэкологические экспедиции Южного федерального университета, систематически проводимые с 2000 года под руководством лаборатории радиоэкологических исследований НИИ физики ЮФУ, по итогам полевых измерений 2023 года подтвердили, что радиационный фон вблизи РоАЭС остается на уровне природных значений и не изменился с допускового периода станции<sup>4</sup>.

Бубликова И.А., Цуверкалова О.Ф., Аксенова К.С. (2021) проанализировали радиационные факторы атмосферного воздуха в районе расположения РоАЭС за предшествующий период (2016-2020 гг.) и также не зафиксировали значимого влияния станции [6]. По сводным данным государственного мониторинга ФМБА России, в 2016-2023 гг. среднегодовые дозы облучения персонала РоАЭС были в 30-50 раз ниже отраслевого норматива (20 мЗв/год) и примерно вдвое ниже основного предела дозы для населения (1 мЗв/год) [7]. В настоящей работе акцент сделан на прямые радиометрические и спектрометрические измерения в ключевых объектах окружающей среды.

Актуальность настоящей работы определяется необходимостью верификации данных радиационного мониторинга и предоставления объективной оценки радиационной безопасности населения, проживающего в 30-километровой зоне наблюдения РоАЭС. Представленные материалы являются продолжением многолетнего временного ряда наблюдений: впервые публикуются результаты систематических замеров за пятилетний период 2021-2025 гг. по широкому спектру техногенных (<sup>137</sup>Cs, <sup>134</sup>Cs, <sup>60</sup>Co, <sup>131</sup>I) и естественных (<sup>40</sup>K, <sup>232</sup>Th, <sup>226</sup>Ra) радионуклидов в атмосферных выпадениях, почве и водных объектах 30-км зоны наблюдения РоАЭС, что позволяет перейти от разрозненных годовых отчетов к анализу межгодовой динамики показателей и оценить устойчивость наблюдаемых тенденций.

Целью работы является анализ межгодовой динамики радиационной обстановки в 30-км зоне наблюдения РоАЭС по данным мониторинга, выполненного специалистами ФГБУЗ ЦГиЭ №5 ФМБА России за период 2021-2025 гг. Объектами исследования являлись атмосферные выпадения, почва и поверхностные воды (водоем-охладитель РоАЭС и Цимлянское водохранилище). Атмосферный воздух в данной работе не рассматривается в соответствии с принятой программой наблюдений.

<sup>4</sup> Ученые ЮФУ зафиксировали отсутствие негативного влияния Ростовской АЭС на экосистемы донского края. – Коммерсантъ-Юг. – 2022. – Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/5447662> (дата обращения: 16.01.2026).

## Методология

Аналитическая база – лаборатория радиологических исследований ФГБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии № 5» ФМБА России (аккредитована). Статистическая обработка данных выполнена с использованием стандартных методов вариационной статистики.

Мониторинг осуществлялся на стационарных постах в г. Волгодонске и г. Цимлянске (Ростовская область). Отбор проб проводился по аттестованным методикам в соответствии с требованиями СанПиН 2.6.1.2523-09 (НРБ-99/2009): атмосферные выпадения собирались на планшеты-подложки с последующим измерением суммарной  $\beta$ -активности и гамма-спектрометрическим анализом на содержание  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{131}\text{I}$ ; пробы поверхностного слоя почвы (0-5 см) отбирались на 6 маршрутных точках в 30-км зоне и анализировались на содержание техноген-

ных и естественных радионуклидов ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ); пробы воды из пруда-охладителя РоАЭС и Цимлянского водохранилища исследовались на суммарную  $\alpha$ - и  $\beta$ -активность, а также на содержание  $^{137}\text{Cs}$ . Гамма-спектрометрический анализ выполнялся по методике, описанной в работах по радиоэкологическому мониторингу зоны наблюдения Волгодонской АЭС [7]. Статистическая обработка данных проводилась с применением стандартных методов вариационной статистики; для оценки межгодовых трендов применялся непараметрический критерий Манна-Кендалла, рекомендованный для анализа временных рядов экологических данных [8].

## Результаты мониторинга

Результаты мониторинга бета-активности атмосферных выпадений приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Среднегодовые значения удельной активности радионуклидов в атмосферных выпадениях за 2021-2025 гг. (Бк/м<sup>2</sup>), данные ФГБУЗ ЦГиЭ №5 ФМБА России

**Table 1.** Average annual values of the specific activity of radionuclides in atmospheric fallout for 2021-2025 (Bq/m<sup>2</sup>) according to data provided by the Federal State Budgetary Healthcare Institution «Centre for Hygiene and Epidemiology No. 5 of the Federal Medical and Biological Agency»

Химический элемент	Цимлянск (среднее/максимальное)	Волгодонск (среднее/максимальное)
2021		
$\Sigma\beta$	1,13±0,99 / 3,90±8,51	1,79±1,07 / 9,02±8,67
$^{60}\text{Co}$	1,84±6,06 / 10,05±8,23	1,45±6,12 / 3,70±8,34
$^{137}\text{Cs}$	1,09±5,19 / 3,81±6,66	1,63±5,15 / 3,65±6,39
$^{134}\text{Cs}$	2,23±4,43 / 7,36±5,85	2,34±4,48 / 8,58±6,06
$^{131}\text{I}$	2,26±5,67 / 6,34±7,50	2,06±5,61 / 6,21±7,42
2022		
$\Sigma\beta$	6,20 ± 0,89 / 12,54 ± 1,31	7,04 ± 0,93 / 14,38 ± 1,49
$^{60}\text{Co}$	2,20 ± 7,39 / 8,70 ± 8,76	1,02 ± 7,29 / 5,53 ± 9,09
$^{137}\text{Cs}$	1,47 ± 5,65 / 4,53 ± 7,05	0,89 ± 5,71 / 5,44 ± 6,11
$^{134}\text{Cs}$	4,19 ± 5,10 / 10,51 ± 6,41	2,31 ± 4,92 / 8,36 ± 5,45
$^{131}\text{I}$	3,68 ± 6,98 / 9,86 ± 8,07	1,59 ± 6,67 / 4,19 ± 7,21
2023		
$\Sigma\beta$	4,98 ± 0,64 / 9,02 ± 0,97	4,42 ± 0,65 / 9,26 ± 0,98
$^{60}\text{Co}$	1,42 ± 7,10 / 6,74 ± 9,94	1,67 ± 6,86 / 9,62 ± 8,95
$^{137}\text{Cs}$	0,65 ± 6,21 / 4,00 ± 11,80	0,89 ± 6,25 / 5,49 ± 12,50
$^{134}\text{Cs}$	2,20 ± 5,58 / 7,57 ± 12,20	4,93 ± 5,48 / 22,30 ± 8,50
$^{131}\text{I}$	2,37 ± 8,23 / 5,89 ± 22,50	2,82 ± 7,00 / 12,12 ± 12,40
2024		
$\Sigma\beta$	6,46 ± 0,75 / 12,12 ± 1,26	3,99 ± 0,55 / 6,97 ± 0,81
$^{60}\text{Co}$	1,53 ± 5,88 / 7,60 ± 11,00	0,56 ± 5,18 / 2,67 ± 7,43

Продолжение таблицы 1

Table 1 continuation

Химический элемент	Цимлянск (среднее/максимальное)	Волгодонск (среднее/максимальное)
$^{137}\text{Cs}$	1,35 ± 5,71 / 6,13 ± 8,17	1,29 ± 5,51 / 5,63 ± 5,83
$^{134}\text{Cs}$	2,32 ± 5,28 / 11,19 ± 6,06	2,88 ± 5,16 / 7,66 ± 5,79
$^{131}\text{I}$	3,04 ± 6,18 / 10,64 ± 8,35	2,81 ± 5,97 / 8,96 ± 6,93
2025		
$\sum\beta$	4,38 ± 0,55 / 5,95 ± 0,66	4,22 ± 0,54 / 8,15 ± 0,89
$^{60}\text{Co}$	0,97 ± 7,24 / 4,31 ± 6,88	2,08 ± 7,48 / 6,81 ± 9,05
$^{137}\text{Cs}$	0,52 ± 5,46 / 4,02 ± 6,90	1,06 ± 5,42 / 6,34 ± 5,57
$^{134}\text{Cs}$	3,87 ± 4,99 / 12,25 ± 6,66	1,48 ± 4,54 / 7,60 ± 4,74
$^{131}\text{I}$	4,29 ± 6,56 / 11,34 ± 9,39	2,24 ± 6,19 / 5,60 ± 6,19

Применение непараметрического критерия Манна-Кендалла, показанное в таблице 2, к пятилетним рядам среднегодовых значений удельной активности атмосферных выпадений не выявило статистически значимых монотонных трендов ни для одного из контролируемых радионуклидов ( $\sum\beta$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{131}\text{I}$ ) ни в Волгодонске, ни в Цимлянске ( $\tau$  от  $-0,60$  до  $+0,60$ , все  $p > 0,10$ ). Наклоны Сена, описывающие величину изменения при наличии тренда, пренебрежимо малы по сравнению с абсолютными значениями показателей. Аналогичная картина наблюдается для водных объектов: ни для водоема-охладителя, ни для Цимлянского водохранилища тенденции к росту или снижению активности не зафиксированы ( $p > 0,12$  для всех параметров).

Корреляционный анализ (критерии Пирсона и Спирмена) не обнаружил статистически значимой линейной или ранговой связи между значениями удельной активности в двух пунктах наблюдения для любого из исследуемых радионуклидов (все  $p > 0,10$ ;  $n = 5$ ). Пример корреляции показан на рисунке 2. Показательно, что высокий коэффициент Пирсона для  $\sum\beta$  ( $r = 0,789$ ) при  $p = 0,112$  не достигает порога значимости вследствие малого объема выборки, то есть данный результат подлежит подтверждению по мере накопления данных. Парный знаковый ранговый тест Вилкоксона, примененный к пяти годовым наблюдениям (2021-2025), не

выявил статистически значимых различий между пунктами Волгодонск и Цимлянск ни по одному из контролируемых показателей атмосферных выпадений ( $p > 0,30$  для всех параметров; при  $n = 5$  порог достижимой мощности составляет  $p = 0,0625$ ). Средние значения за период наблюдений по пунктам близки:  $\sum\beta - 4,29$  и  $4,63$  Бк/м<sup>2</sup>,  $^{137}\text{Cs} - 1,15$  и  $1,02$  Бк/м<sup>2</sup>,  $^{134}\text{Cs} - 2,79$  и  $2,96$  Бк/м<sup>2</sup> для Волгодонска и Цимлянского соответственно. Результат парного t-теста качественно согласуется с критерием Вилкоксона ( $p > 0,19$  для всех параметров). Таким образом, гипотеза о равенстве уровней радиоактивного загрязнения атмосферных выпадений в двух пунктах наблюдения не может быть отвергнута, что указывает на единый региональный источник формирования фона – глобальный атмосферный перенос – при отсутствии локального вклада Ростовской АЭС.

Коэффициент вариации активности от 20 до 42% по всем параметрам и пунктам свидетельствует об умеренной межгодовой изменчивости, типичной для атмосферных выпадений в условиях естественного фона (влияние метеорологических условий, количества осадков).

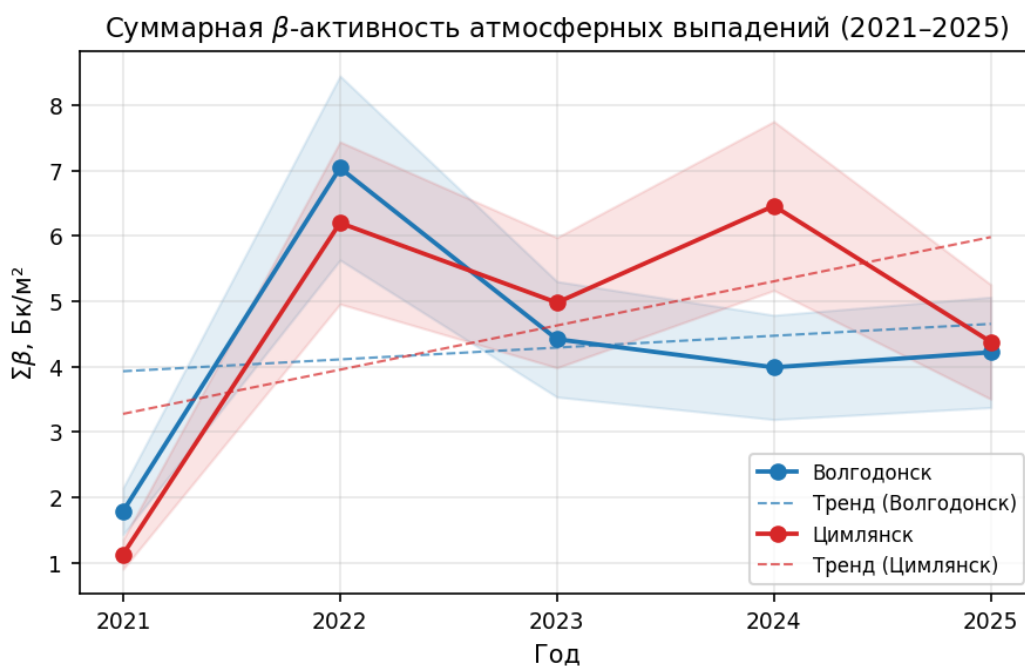
Примеры незначимых трендов приведены на рисунке 1.

Результаты анализа активности радионуклидов в почве и водных объектах приведены в таблицах 3-6.

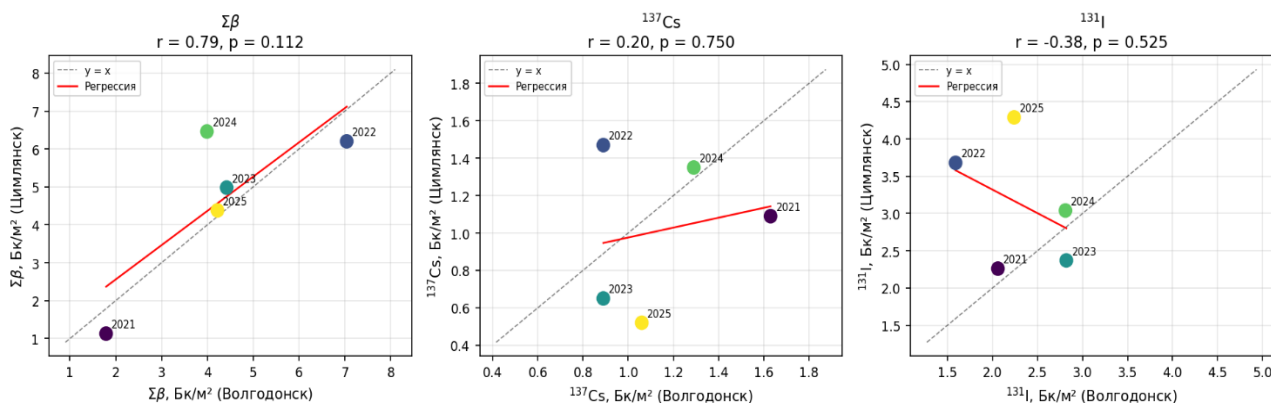
**Таблица 2.** Результаты анализа временных трендов (критерий Манна-Кендалла, 2021-2025 гг.), атмосферные выпадения

**Table 2.** Results of trend analysis (Mann-Kendall test, 2021-2025), atmospheric fallout

Параметр	Пункт	$\tau$	$p$	Наклон Сена, Бк/(м <sup>2</sup> ·год)	Тренд
$\Sigma\beta$	Волгодонск	0,00	1,000	+0,065	отсутствует
$\Sigma\beta$	Цимлянск	+0,20	0,807	+0,471	отсутствует
<sup>137</sup> Cs	Волгодонск	-0,10	1,000	-0,057	отсутствует
<sup>137</sup> Cs	Цимлянск	-0,40	0,462	-0,104	отсутствует
<sup>131</sup> I	Волгодонск	+0,20	0,807	+0,131	отсутствует
<sup>131</sup> I	Цимлянск	+0,60	0,221	+0,384	отсутствует



**Рисунок 1.** Тренды суммарной бета-активности атмосферных выпадений  
**Figure 1.** Trends in the total beta activity of atmospheric fallout



**Рисунок 2.** Корреляция активности атмосферных выпадений между населенными пунктами  
**Figure 2.** Correlation of atmospheric precipitation activity between populated areas

**Таблица 3.** Среднегодовые значения удельной активности радионуклидов в почве за 2025 г. (ср./макс.), маршруты 1-6 (Бк/кг), данные ФГБУЗ ЦГиЭ №5 ФМБА России

**Table 3.** Average annual values of the radionuclide activity concentration in soil for 2025 (average/maximum), routes 1–6 (Bq/kg) according to data provided by the Federal State Budgetary Healthcare Institution «Centre for Hygiene and Epidemiology No. 5 of the Federal Medical and Biological Agency»

Элемент	Маршрут 1	Маршрут 2	Маршрут 3	Маршрут 4	Маршрут 5	Маршрут 6
$\Sigma\beta$	175 / 206	178 / 202	192 / 201	169 / 175	186 / 201	119 / 206
$^{137}\text{Cs}$	1,0 / 1,9	6,0 / 9,2	4,4 / 7,0	3,4 / 4,1	1,0 / 1,7	0,7 / 2,2
$^{60}\text{Co}$	0,8 / 2,6	1,1 / 3,3	0,9 / 1,6	1,7 / 3,8	0,2 / 0,7	0,2 / 1,0

**Таблица 4.** Среднегодовые значения удельной активности радионуклидов в воде водоема-охладителя РоАЭС (2021-2025 гг.), данные ФГБУЗ ЦГиЭ №5 ФМБА России

**Table 4.** Average annual values of the radionuclide activity concentration in the water of the RoNPP cooling pond (2021–2025) according to data provided by the Federal State Budgetary Healthcare Institution «Centre for Hygiene and Epidemiology No. 5 of the Federal Medical and Biological Agency»

Год	$\Sigma\beta$ (ср./макс.)	$\Sigma\alpha$ (ср./макс.)	$^{137}\text{Cs}$ (ср./макс.)
2021	0,14 / 0,28	0,05 / 0,18	0,69 / 2,26
2022	0,18 / 0,37	0,02 / 0,09	0,49 / 1,60
2023	0,11 / 0,20	0,07 / 0,14	0,64 / 2,15
2024	0,10 / 0,35	0,00 / 0,04	0,27 / 0,90
2025	0,12 / 0,27	0,00 / 0,01	0,28 / 0,89

**Таблица 5.** Среднегодовые значения удельной активности радионуклидов в воде Цимлянского водохранилища (2021-2025 гг.), данные ФГБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии №5» ФМБА России

**Table 5.** Average annual values of the radionuclide activity concentration in the water of the Tsimlyansk Reservoir (2021-2025) according to data provided by the Federal State Budgetary Healthcare Institution «Centre for Hygiene and Epidemiology No. 5 of the Federal Medical and Biological Agency»

Год	Суммарная $\beta$ -активность (ср./макс.), Бк/кг	Суммарная $\alpha$ -активность (ср./макс.), Бк/кг	$^{137}\text{Cs}$ (ср./макс.), Бк/кг
2021	$0,07 \pm 0,04 / 0,12 \pm 0,06$	$0,04 \pm 0,05 / 0,11 \pm 0,08$	$0,35 \pm 1,72 / 1,12 \pm 2,20$
2022	$0,08 \pm 0,02 / 0,20 \pm 0,03$	$0,01 \pm 0,01 / 0,04 \pm 0,02$	$0,31 \pm 1,73 / 0,94 \pm 2,00$
2023	$0,07 \pm 0,02 / 0,20 \pm 0,03$	$0,03 \pm 0,01 / 0,07 \pm 0,02$	$0,65 \pm 1,74 / 2,34 \pm 1,93$
2024	$0,09 \pm 0,03 / 0,28 \pm 0,04$	$0,02 \pm 0,01 / 0,10 \pm 0,02$	$0,68 \pm 1,59 / 1,45 \pm 1,76$
2025	$0,10 \pm 0,02 / 0,30 \pm 0,03$	$0,00 \pm 0,01 / 0,01 \pm 0,01$	$0,28 \pm 1,52 / 0,88 \pm 1,67$

Результаты анализа почвы с шести маршрутов (2025 г.), приведенные в таблице 3, показывают, что содержание техногенного  $^{137}\text{Cs}$  колеблется в пределах 1-6 Бк/кг, что не превышает средних многолетних значений для Ростовской области, обусловленных глобальными выпадениями после чернобыльской аварии. Содержание естественных радионуклидов ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ) соответствует региональному геологическому фону. Удельная активность  $^{60}\text{Co}$  и  $^{134}\text{Cs}$  в большинстве проб находится ниже предела обнаружения или на следовых уровнях.

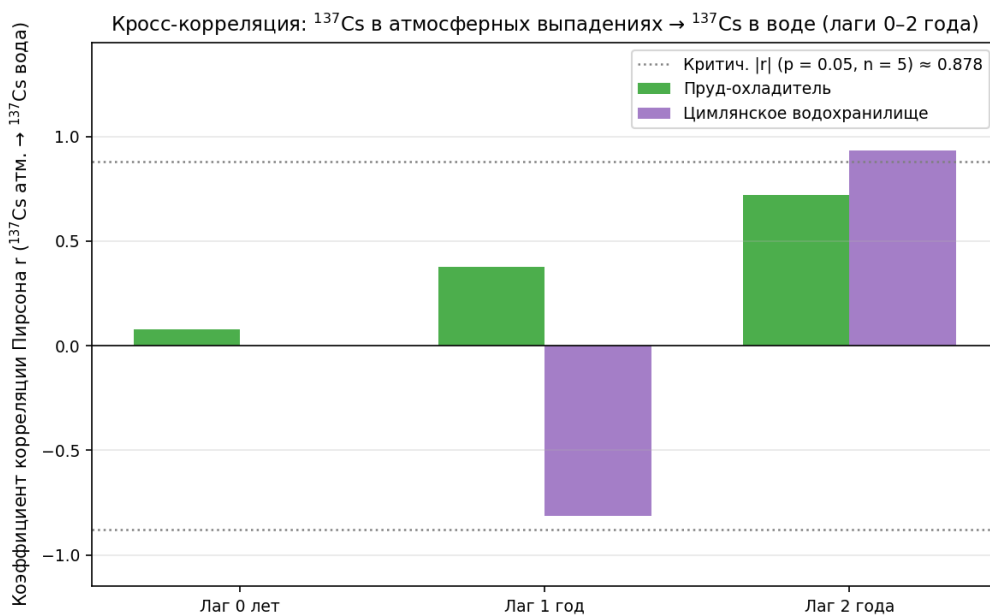
Как следует из данных таблицы 5, значения суммарной  $\beta$ - и  $\alpha$ -активности в воде Цимлянского водохранилища за весь период наблюдений остаются стабильно низкими и не превышают нормативных уровней для питьевой воды по НРБ-99/2009. Соответствующие тренды показаны на рисунке 3.

Среднегодовое содержание цезия-137 находится в пределах 0,3-0,7 Бк/кг, что на 1-2 порядка ниже допустимого уровня (11 Бк/кг). Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии техногенного влияния Ростовской АЭС на гидросистему Цимлянского водохранилища.

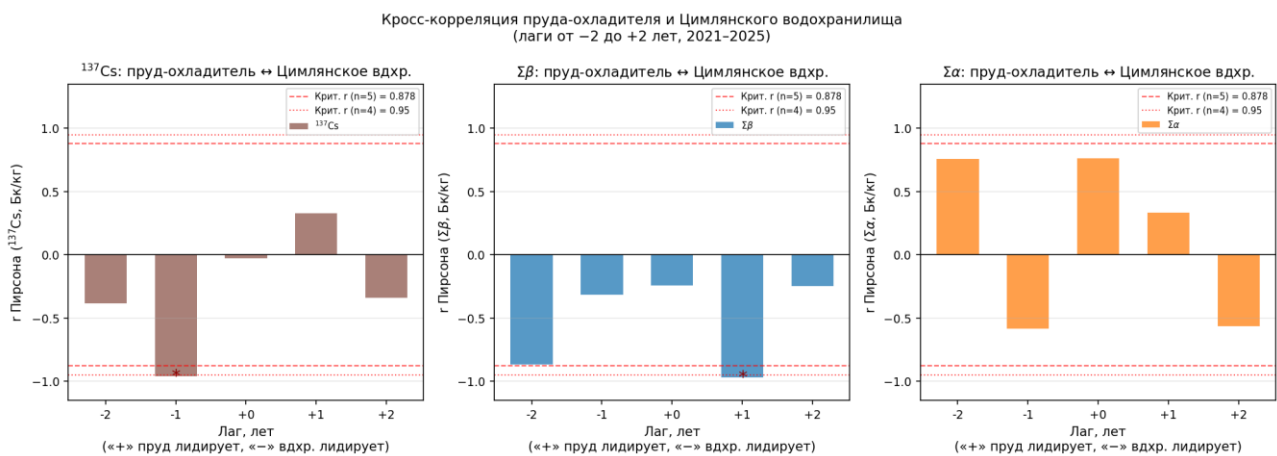
Кросс-корреляционный анализ между среднегодовой удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  в атмосферных выпадениях (усредненной по двум пунктам) и содержанием  $^{137}\text{Cs}$  в воде пруда-охладителя и Цимлянского водохранилища для лагов 0, 1 и 2 года показал отсутствие значимой связи:  $p > 0,18$  для всех сочетаний объект  $\times$  лаг (рис. 4, 5). При лаге 0 лет коэффициенты корреляции близки к нулю ( $r = 0,08$  и  $r = 0,002$  для пруда и водохранилища соответственно), что исключает непосредственный перенос радионуклидов из атмосферы в водные объекты в пределах одного года.



**Рисунок 3.** Сопоставление активности воды Цимлянского водохранилища с нормативами  
**Figure 3.** Comparison of water activity in the Tsimlyansk Reservoir with standard values



**Рисунок 4.** Кросс-корреляционный анализ активности воды и атмосферных выпадений  
**Figure 4.** Cross-correlation analysis of water activity and atmospheric precipitation



**Рисунок 5.** Кросс-корреляционный анализ активности воды водоема-охладителя и Цимлянского водохранилища

**Figure 5.** Cross-correlation analysis of water activity in the cooling pond and the Tsimlyansk Reservoir

Высокий коэффициент при лаге 2 года для Цимлянского водохранилища ( $r = 0,932$ ,  $p = 0,24$ ) представляет методологический интерес, однако при  $n = 3$  статистически не интерпретируется. Этот результат обосновывает необходимость продления ряда наблюдений: при накоплении данных за 8-10 лет кросс-корреляция с лагом 1-2 года приобретет достаточную мощность для проверки гипотезы о связи атмосферных и водных маршрутов миграции радионуклидов.

### Сравнение с фоном

Сопоставление полученных данных с опубликованными фоновыми диапазонами для европейской части России (данные НПО «Тайфун», ЕГАСМРО) показало следующее.

Среднегодовые значения  $\sum\beta$  в Волгодонске ( $4,29$  Бк/м<sup>2</sup>) и Цимлянске ( $4,63$  Бк/м<sup>2</sup>) укладываются в нижнюю половину регионального фонового диапазона  $1-10$  Бк/м<sup>2</sup>, составляя 43-46% от его верхней границы. Среднегодовая удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  ( $1,15$  и  $1,02$  Бк/м<sup>2</sup>) также соответствует середине фонового диапазона  $0,3-2,5$  Бк/м<sup>2</sup> (46% от верхней границы). Ни в одном году ни один показатель не вышел за пределы фонового диапазона.

Среднегодовая концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в пруде-охладителе ( $0,474$  Бк/кг) и Цимлянском водохранилище ( $0,454$  Бк/кг) находится в пределах фонового диапазона для поверхностных вод европейской части России ( $0,1-1,0$  Бк/кг) и составляет около 47% от его верхней границы. Значения  $\sum\beta$  в обоих водных объектах ( $0,13$  и  $0,082$  Бк/кг) также укладываются в региональный фон ( $0,05-0,20$  Бк/кг).

Среднее содержание  $^{137}\text{Cs}$  по шести маршрутам (2025 г.) составило  $2,75$  Бк/кг при максимуме  $9,2$  Бк/кг. Оба значения вписываются в фоновый диапазон Ростовской области ( $2-15$  Бк/кг), определенный глобальными выпадениями после ядерных испытаний 1950-1960-х гг. и аварии на ЧАЭС.

Таким образом, все контролируемые показатели по всем объектам среды стабильно находятся в пределах регионального радиационного фона.

### Заключение

Комплексный радиационный мониторинг, проведенный ФГБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии №5» ФМБА России в 2021-2025 гг. в 30-км зоне Ростовской АЭС, позволяет сделать следующие выводы:

1. Уровни загрязнения атмосферных выпадений техногенными радионуклидами ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{131}\text{I}$ ) находятся в пределах глобального фона и не имеют связи с эксплуатацией АЭС.

2. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в почве не превышает  $5-10$  Бк/кг, что обусловлено глобальными выпадениями прошлых десятилетий и не связано с текущей деятельностью станции.

3. Вода водоема-охладителя и Цимлянского водохранилища характеризуется крайне низкими значениями удельной активности радионуклидов, на порядки ниже нормативных уровней.

4. Непараметрический критерий Манна-Кендалла не выявил статистически значимых монотонных трендов ни по одному из контролируемых радионуклидов ни в одном из пунктов наблюдения и ни для одного объекта окружающей среды, что подтверждает стабильность радиационной обстановки.

5. Количественное сопоставление с данными НПО «Тайфун» и ЕГАСМРО показало, что наблюдаемые значения удельной активности во всех объектах среды составляют 43-47% от верхней границы соответствующего регионального фонового диапазона, что верифицирует тезис об отсутствии дополнительного вклада РоАЭС сверх природного фона.

6. Деятельность Ростовской АЭС не оказывает значимого техногенного воздействия на радиационную обстановку в 30-километровой зоне наблюдения. Система радиационного контроля ФМБА России является эффективной и позволяет своевременно выявлять любые отклонения. Продление непрерывного ряда наблюдений до 8-10 лет позволит придать достаточную статистическую мощность кросс-корреляционному анализу атмосферных и водных маршрутов миграции радионуклидов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Cao Y., Lin J., Zhai K. et al. Long-term investigation of environmental radioactivity levels and public health around the Qinshan Nuclear Power Plant, China. *Scientific Reports*. 2022;12:4945. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09091-2>
2. Assessment of radiation exposure and public health before and after the operation of Sanmen nuclear power plant. *Frontiers in Public Health*. 2023;11:1131739. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1131739>
3. Gellenoncourt A., Ayoub A., Wainwright H.M. Optimizing radiation monitoring networks to improve emergency response strategies during nuclear power plant accidents. *Scientific Reports*. 2025;15:11914. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95571-0>
4. Шумский И.Г., Романова С.А. Радиационная обстановка в зоне наблюдения Ростовской АЭС при работе энергоблока № 1 на мощности выше номинальной. *Медицина экстремальных ситуаций*. 2012;2:35-42. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21690679> (дата обращения: 15.01.2026).  
Shumsky I.G., Romanova S.A. Radiation situation in the observation zone of the Rostov NPP during operation of power unit No. 1 at power above nominal. *Meditsina ekstremal'nykh situatsiy*. 2012;2:35-42. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21690679> (accessed: 15.01.2026).
5. Шиманская Е.И., Буряева Е.А., Вардуни Т.В. и др. Результаты экогенетического мониторинга 30-ти километровой зоны Ростовской АЭС. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2013;10-3:449-450. Режим доступа: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=4229> (дата обращения: 15.01.2026).  
Shimanskaya E.I., Buraeva E.A., Varduni T.V., et al. Results of ecogenetic monitoring of the 30-kilometer zone of the Rostov NPP. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2013;10-3:449-450. (In Russ.). Available at: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=4229> (accessed: 15.01.2026).
6. Бубликова И.А., Цуверкалова О.Ф., Аксенова К.С. Анализ влияния эксплуатации Ростовской АЭС на радиационные факторы атмосферного воздуха территории размещения. *Глобальная ядерная безопасность*. 2021;3:7-16. <https://doi.org/10.26583/gns-2021-03-01>  
Bublikova I.A., Tsuerkalova O.F., Aksenova K.S. Analysis of the impact of Rostov NPP operation on radiation factors of atmospheric air in the location area. *Global nuclear safety*. 2021;3:7-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2021-03-01>
7. Буряева Е.А., Давыдов М.Г., Зорина Л.В., Кобцева М.А., Стасов В.В. Радиоэкологический мониторинг зоны наблюдения Волгодонской АЭС. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки*. 2010; Спецвыпуск:154-159. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/radioekologicheskiy-monitoring-zony-nablyudeniya-volgodonskoy-aes> (дата обращения: 16.01.2026).  
Buraeva E.A., Davydov M.G., Zorina L.V., Kobtseva M.A., Stasov V.V. Radioecological monitoring of the surveillance zone of the Volgodonsk NPP. *Bulletin of Higher Education Institutes. North Caucasus Region. Natural Sciences*. 2010; Спец.:154-159. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/radioekologicheskiy-monitoring-zony-nablyudeniya-volgodonskoy-aes> (accessed: 16.01.2026).
8. Gilbert R.O. *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1987. Available at: [https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1197046/m2/1/high\\_res\\_d/7037501.pdf](https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1197046/m2/1/high_res_d/7037501.pdf) (accessed: 19.01.2026).

ВКЛАД АВТОРОВ:

**Серко А.О.** – организация и проведение натуральных отборов проб, выполнение лабораторных радиометрических и гамма-спектрометрических измерений, первичная верификация экспериментальных данных, подготовка таблиц и иллюстраций;

**Лапкис А.А.** – математико-статистическая обработка временных рядов (трендовый, корреляционный и кросс-корреляционный анализ), интерпретация результатов, формулировка выводов, редактирование и подготовка окончательной версии рукописи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Serko A.O.** – organization and carrying out field sampling, performance of laboratory radiometric and gamma-spectrometric measurements, primary verification of experimental data, preparation of tables and figures;

**Lapkis A.A.** – mathematical and statistical processing of time series (trend, correlation, and cross-correlation analysis), interpretation of results, formulation of conclusions, editing and preparation of the final manuscript version.

FUNDING:

The authors declare no external funding

CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare no conflict of interest.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Алевтина Олеговна Серко**, эксперт-физик, Федеральное медико-биологическое агентство (ФМБА России), г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0002-5176-170X>

**Александр Аркадьевич Лапкис**, кандидат технических наук, доцент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-9431-7046>

e-mail: AALapkis@mephi.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Alevtina O. Serko**, Expert Physicist, Federal Medical and Biological Agency (FMBA of Russia), Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation

<https://orcid.org/0009-0002-5176-170X>

**Aleksandr A. Lapkis**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Atomic Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-9431-7046>

e-mail: AALapkis@mephi.ru

Поступила в редакцию / Received 20.01.2026

После доработки / Revision 03.06.2026

Принята к публикации / Accepted 05.06.2026

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

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-03>

УДК 528.4:621.039

EDN DMIDHK

Оригинальная статья / Original paper



**Применение наземного лазерного сканирования при пусконаладочных работах на АЭС: опыт и перспективы**

И.И. Зайкин<sup>1</sup>✉, С.И. Рясный<sup>2</sup>, К.В. Булахтин<sup>3</sup>, А.В. Щугорев<sup>3</sup>, Р.Ш. Валеев<sup>1</sup>,  
Н.А. Карпенко<sup>4</sup>

<sup>1</sup>АО «Аккую Нуклеар», Гюльнар, Мерсин, Турецкая Республика

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup>АО «Атомтехэнерго», г. Москва, Российская Федерация

<sup>4</sup>РУП «Белорусская АЭС», Ворнянский с/с, Островецкий район, Гродненская обл., Республика Беларусь

✉ zaykin@hotmail.com

**Аннотация.** В процессе строительства и монтажа АЭС в ее проект вносятся неизбежные изменения, вследствие чего возникают отличия реального физического состояния построенной АЭС от ее проектной цифровой модели. Вследствие системного ограничения традиционных методов документирования, при которых фиксируются лишь те параметры, которые считаются значимыми на момент приемки работ, исполнительная документация, которая должна отражать эти изменения, не всегда содержит геометрическую информацию с той степенью детализации, которая требуется для инженерных расчетов. Для некоторых инженерных задач, возникающих при пусконаладочных работах (ПНР), требуются данные о фактическом состоянии объектов с точностью и полнотой, практически недостижимыми при традиционном визуальном контроле и ручных обмерах, но достигаемыми с помощью современной технологии наземного лазерного сканирования (НЛС). Представлен анализ применения НЛС при ПНР на атомных электростанциях, а также при выводе ядерных объектов из эксплуатации. На основе опыта работ на резервной дизельной электростанции энергоблока № 3 Ростовской АЭС, на энергоблоке № 2 Белорусской АЭС и при обследовании главного корпуса энергоблоков Нововоронежской АЭС показана практическая эффективность метода для решения конкретных инженерных задач: верификации фактического положения оборудования, обоснования сейсмостойкости, документирования состояния объекта на момент приемки. Установлено систематическое расхождение между данными традиционной документации и фактическим состоянием смонтированного оборудования. Установлено, что однажды созданное облако точек является долгосрочным информационным активом, применимым как при пусконаладочных работах, так и в ходе последующей эксплуатации. Показаны возможные направления применения технологии НЛС в рамках ПНР и в период промышленной эксплуатации. Рассмотрены условия целесообразного применения НЛС, его ограничения и перспективы использования на строящихся АЭС российского дизайнера, в частности на АЭС «Аккую».

**Ключевые слова:** наземное лазерное сканирование, лазерный сканер, пусконаладочные работы, верификация конфигурации, цифровая модель, сейсмостойкость, облако точек

**Для цитирования:** Зайкин И.И., Рясный С.И., Булахтин К.В., Щугорев А.В., Валеев Р.Ш., Карпенко Н.А. Применение наземного лазерного сканирования при пусконаладочных работах на АЭС: опыт и перспективы. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(2):27-40. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-03>

**For citation:** Zaykin I.I., Ryasny S.I., Bulakhtin K.V., Shchugorev A.V., Valeev R.Sh., Karpenko N.A. Application of terrestrial laser scanning in NPP commissioning works: experience and prospects. *Nuclear Safety*. (In Russ.). 2026;16(2):27-40. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-03>

## Application of terrestrial laser scanning in NPP commissioning works: experience and prospects

Ivan I. Zaykin<sup>1</sup> ✉, Sergey I. Ryasny<sup>2</sup>, Konstantin V. Bulakhtin<sup>3</sup>, Aleksey V. Shchugorev<sup>3</sup>,  
Rinat Sh. Valeev<sup>1</sup>, Nikolai A. Karpenko<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Akkuyu Nuclear JSC, Gulnar, Mersin, Republic of Turkey

<sup>2</sup>National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI), Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup>JSC «Atomtekhenergo», Moscow, Russian Federation

<sup>4</sup>SUE «Belarusian NPP», Vornyan village council, Ostrovets district, Grodno region, Republic of Belarus

✉ zaykin@hotmail.com

**Abstract.** During the construction and installation of a nuclear power plant, unavoidable changes are introduced into its design, resulting in differences between the actual physical condition of the constructed NPP and its digital design model. Due to the systemic limitations of traditional documentation methods, which record only those parameters considered significant at the time of acceptance of work, the as-built documentation does not always contain geometric information with the degree of detail required for engineering calculations. Certain engineering tasks arising during commissioning and start-up operations require data on the actual condition of facilities with a level of accuracy and comprehensiveness that is virtually unattainable through traditional visual inspection and manual measurements, but which can be achieved using modern terrestrial laser scanning (TLS) technology. An analysis of TLS application during commissioning works at nuclear power plants and during nuclear facility decommissioning is presented. Based on the experience of work at the backup diesel power plant of power unit No. 3 of the Rostov NPP, at power unit No. 2 of the Belarusian NPP, and during the survey of the main building of Novovoronezh NPP power units, the practical effectiveness of the method for solving specific engineering problems is shown: verification of the actual position of the equipment, justification of earthquake resistance, documentation of the condition of the object at the time of acceptance. A systematic discrepancy between traditional documentation data and the actual condition of installed equipment has been established. It has been established that once a point cloud is created, it is a long-term information asset, applicable both during commissioning and during subsequent operation. Possible directions of application of the TLS technology within the framework of the commissioning work and during the period of industrial operation are shown. The conditions for rational application of TLS, its limitations and prospects for use at Russian-designed NPPs under construction, particularly at Akkuyu NPP, are considered.

**Keywords:** terrestrial laser scanning, laser scanner, commissioning works, configuration verification, digital model, seismic qualification, point cloud

Современные атомные электростанции российского дизайна проектируются и строятся с применением трехмерных цифровых моделей. Генеральный проектировщик формирует проектную цифровую модель объекта, которая охватывает все системы станции и служит основой для выпуска рабочей документации.

Проектная цифровая модель АЭС создается на основе конструкторской документации и отражает объект таким, каким он должен быть построен. Однако после завершения монтажа на практике возникает неизбежный разрыв между этой моделью и фактическим состоянием построенного объекта, так как в процессе монтажа принимаются многочисленные технические решения, не предусмотренные проектом или отличающиеся от него в деталях: трасса трубопровода может быть изменена во избежание

конфликта с другими коммуникациями; опорная конструкция может быть переработана на месте для обеспечения доступа к смежному оборудованию; крепежные элементы могут устанавливаться с отклонениями, допустимыми с точки зрения монтажных допусков, но значимыми для расчетных задач.

Исполнительная документация, которая должна отражать эти изменения, не всегда содержит геометрическую информацию с той степенью детализации, которая требуется для инженерных расчетов. Это является следствием системного ограничения традиционных методов документирования, при которых фиксируются лишь те параметры, которые считаются значимыми на момент приемки работ. Однако для некоторых инженерных задач, возникающих при ПНР, требуются данные о фактическом состоянии

объекта с точностью и полнотой, принципиально недостижимыми при ручных обмерах.

Наземное лазерное сканирование (НЛС) – технология дистанционного получения трехмерных координат поверхностей объектов, позволяющая создать детальную цифровую модель фактического состояния помещений и оборудования непосредственно в том виде, в каком они существуют на момент съемки. В отличие от проектной модели, отражающей замысел конструктора, результат сканирования фиксирует реальное физическое состояние.

Таким образом, НЛС не заменяет проектную цифровую модель и не конкурирует с ней. НЛС является инструментом верификации, позволяющим восполнить недостающие геометрические данные там, где традиционные методы документирования оказываются недостаточными.

При наземном лазерном сканировании автоматически измеряются координаты множества точек поверхности объекта путем последовательного направления лазерного луча по различным азимутам и углам возвышения. Современные сканирующие системы позволяют выполнять до нескольких миллионов измерений в секунду и обеспечивают угловое покрытие  $360^\circ$  по горизонтали и до  $270^\circ$  по вертикали.

Результатом сканирования является облако точек – совокупность трехмерных координат, описывающая видимые поверхности всех объектов в зоне досягаемости сканера. Каждая точка облака имеет известные пространственные координаты в системе отсчета прибора. При проведении съемки с нескольких станций (позиций сканера) результаты объединяются в единое облако точек в общей системе координат в ходе камеральной обработки.

Важным свойством облака точек является его архивный характер: в нем содержатся координаты всех видимых поверхностей объекта, а не только тех, которые представляли интерес на момент съемки. Это означает, что при возникновении новых вопросов к геометрии объекта можно обратиться к уже созданному облаку точек, не проводя повторную съемку.

Принципиальная целесообразность применения НЛС для технических задач убедительно продемонстрирована при проектировании и реконструкции трубопроводных систем промышленных установок [1] и при модернизации судовых систем [2].

Применение НЛС на ядерных объектах – в том числе для документирования фактического состояния помещений и оборудования, поддержки вывода из эксплуатации и обеспечения радиационной безопасности – активно развивалось в последние годы – применительно к эксплуатации и техническому обслуживанию действующих блоков [3], поддержке цифрового строительного контроля [4] и оценке объемов демонтажа при выводе из эксплуатации [5].

Компанией ГК «Неолант» (Москва) в рамках разработки платформы Digital Decommissioning были выполнены работы по лазерному сканированию главного корпуса энергоблоков № 1 и 2 Нововоронежской АЭС в целях создания цифровой исполнительной инженерно-радиационной модели объекта для поддержки вывода из эксплуатации<sup>1</sup>. Результаты показали, что сведения традиционного «бумажного» обследования систематически расходятся с данными, полученными по результатам лазерного сканирования: в главном корпусе 1, 2 блоков Нововоронежской АЭС (НВАЭС) выявлено занижение количества металлических конструкций в реестре на 45 %; значительные расхождения зафиксированы более чем в 20 % помещений. Этот опыт самостоятельно подтверждает тезис, обоснованный в настоящей статье: исполнительная документация не отражает реальное состояние объекта с точностью, необходимой для инженерных расчетов. Облако точек, созданное на объекте, сохраняет ценность на протяжении всего жизненного цикла станции, вплоть до окончательного вывода из эксплуатации, что дополнительно обосновывает целесооб-

<sup>1</sup> Тихоновский В.Л., Гуралев С.С. Ключевые проблемы сферы ВЭ ОИАЭ. Результаты практического применения платформы Digital Decommissioning : доклад на конференции по обращению с РАО. – Москва: АО ГК «Неолант», 2023. – Режим доступа: <https://u.to/9qySIg> (дата обращения: 25.03.2026).

разность формирования такого актива уже в период ПНР. Вместе с тем применение НЛС именно в контексте пусконаладочных работ на строящихся АЭС является относительно менее изученным направлением, что и определяет актуальность настоящей работы.

В настоящей работе на основе конкретного опыта применения данной технологии при ПНР на АЭС показаны возможности, условия и перспективы ее использования на строящихся АЭС и при дальнейшей эксплуатации. В качестве опыта применения рассмотрены три практических случая: работы на резервной дизельной электростанции (РДЭС) энергоблока № 3 Ростовской АЭС<sup>2</sup>, работы на оборудовании энергоблока № 2 Белорусской АЭС (БелАЭС), а также обследование главного корпуса НВАЭС, проведенное в рамках задач вывода из эксплуатации.

### Опыт применения НЛС на Ростовской АЭС

Работы по наземному лазерному сканированию проводились на РДЭС энергоблока № 3 Ростовской АЭС в период сооружения объекта. Задача состояла в восстановлении информационной модели: сравнении проектной трехмерной модели с фактическим состоянием конструкций и оборудования на момент съемки.

Следует подчеркнуть, что речь идет о работах на РДЭС – отдельном здании в составе энергоблока, а не об энергоблоке в целом. Это принципиально важно для оценки трудозатрат и масштаба работ. Вместе с тем именно этот опыт является первым задокументированным случаем применения НЛС на АЭС для задач верификации конфигурации.

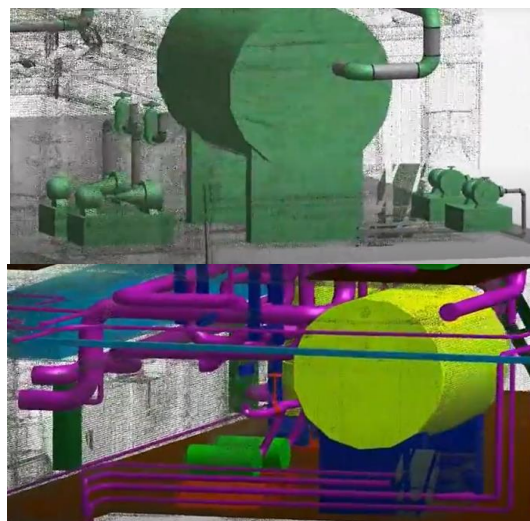
На Ростовской АЭС применялись сканеры Leica ScanStation P20, относящиеся к профессиональному классу наземных сканеров

с дальностью действия до 120 метров и точностью 3 мм на расстоянии 50 м.

За два дня полевых работ была выполнена съемка с 38 станций. Выполнение сканирования осложнялось проводившимися параллельно совмещенными строительно-монтажными работами на объекте. Однако бесконтактный характер метода и скорость съемки позволили свести к минимуму взаимное влияние совмещенных работ.

Первичная камеральная обработка – объединение результатов съемки со всех 38 станций в единое облако точек в общей системе координат – была выполнена за один рабочий день.

Последующее создание векторной модели из облака точек (рис. 1) потребовало 23 человеко-дней. Этот показатель заслуживает отдельного комментария: он отражает трудоемкость не сканирования как такового, а последующего моделирования – построения геометрических объектов (трубопроводов, конструкций, оборудования) по данным облака точек. Данная работа является преимущественно ручной, несмотря на наличие инструментов автоматического распознавания геометрических примитивов в современных программных комплексах. Это важная характеристика технологии, которую необходимо учитывать при планировании работ.



**Рисунок 1.** Проектная 3D модель оборудования РДЭС Ростовской АЭС, наложенная на облако точек, полученных в результате сканирования и полученная в результате уточненная 3D модель

**Figure 1.** Design 3D model of BDPP equipment at Rostov NPP superimposed on the point cloud obtained from scanning, and the resulting refined 3D model

<sup>2</sup> Аникушкин М., Белецкий Е., Окунькова Е., Серков С., Смирнов С. Лазерное сканирование и 3D-моделирование для восстановления информационной модели Ростовской АЭС. – ISICAD. – 2014. – Режим доступа: <https://isicad.ru/ru/articles.php?article%20num=17243> (дата обращения: 25.03.2026)

Работы на Ростовской АЭС имеют важное методологическое значение: они показывают, что технология НЛС применима на объектах атомной энергетики в условиях продолжающегося строительства, а полевая часть работ может быть выполнена в минимальные сроки при относительно небольшом количестве станций. Основная трудоемкость сосредоточена в камеральной обработке и зависит от конечной цели: если требуется полная векторная модель, затраты существенны; если достаточно облака точек для метрических измерений или локального анализа – они значительно ниже.

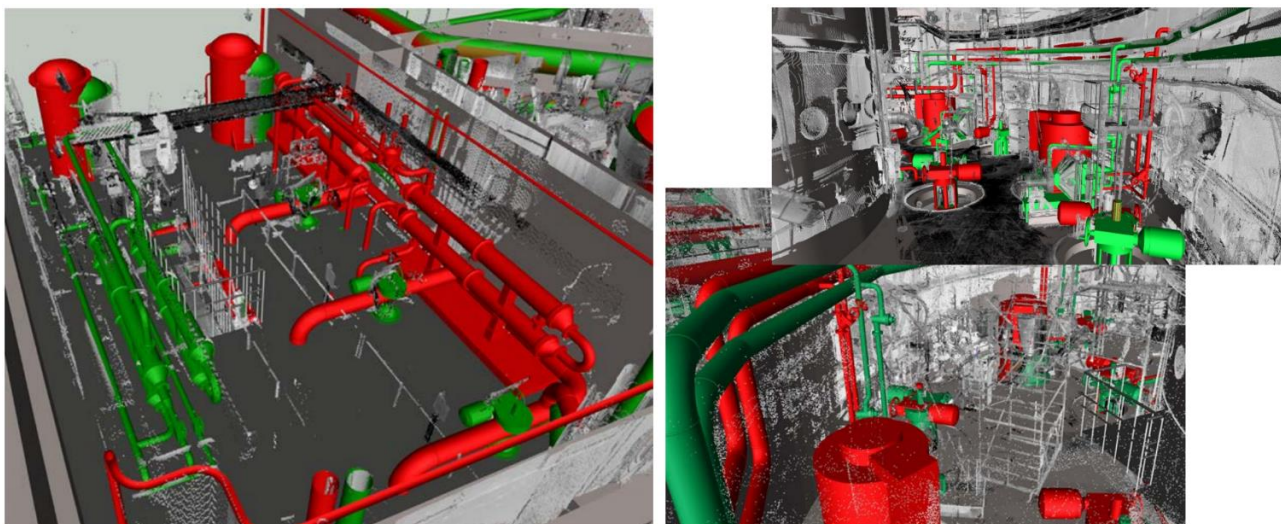
Вместе с тем опыт Ростовской АЭС охватывал только задачу восстановления информационной модели. Параллельно схожая по методу, но принципиально отличная по масштабу и цели работа была выполнена при обследовании Нововоронежской АЭС.

### Опыт применения НЛС на Нововоронежской АЭС

Компанией ГК «Неолант» в рамках разработки платформы цифрового вывода из эксплуатации Digital Decommissioning были выполнены работы по лазерному сканированию и сферическому фотографированию главного корпуса энергоблоков № 1 и 2 НВАЭС. Целью работ являлось создание цифровой

исполнительной инженерно-радиационной модели (ЦИИРМ) – актуализированной трехмерной модели объекта, отражающей фактическое состояние помещений и оборудования и служащей информационной основой для проектирования работ по выводу из эксплуатации. В отличие от опыта Ростовской и Белорусской АЭС, задача здесь состояла не в обеспечении ПНР, а в документировании давно эксплуатируемого объекта, исходная документация которого к тому моменту в значительной мере утратила актуальность.

Методология работ предусматривала сопоставление трехмерной модели, построенной по исходной проектной и исполнительной документации, с моделью, полученной по результатам лазерного сканирования (рис. 2). Такое сравнение позволяет выявить все отклонения фактического состояния объекта от документального – в том числе несанкционированные изменения, накопленные за десятилетия эксплуатации. Результатом являлась ЦИИРМ – модель, одновременно включающая инженерные и радиационные данные по каждому элементу оборудования и строительных конструкций, необходимые для расчета объемов радиоактивных отходов и планирования демонтажных работ.

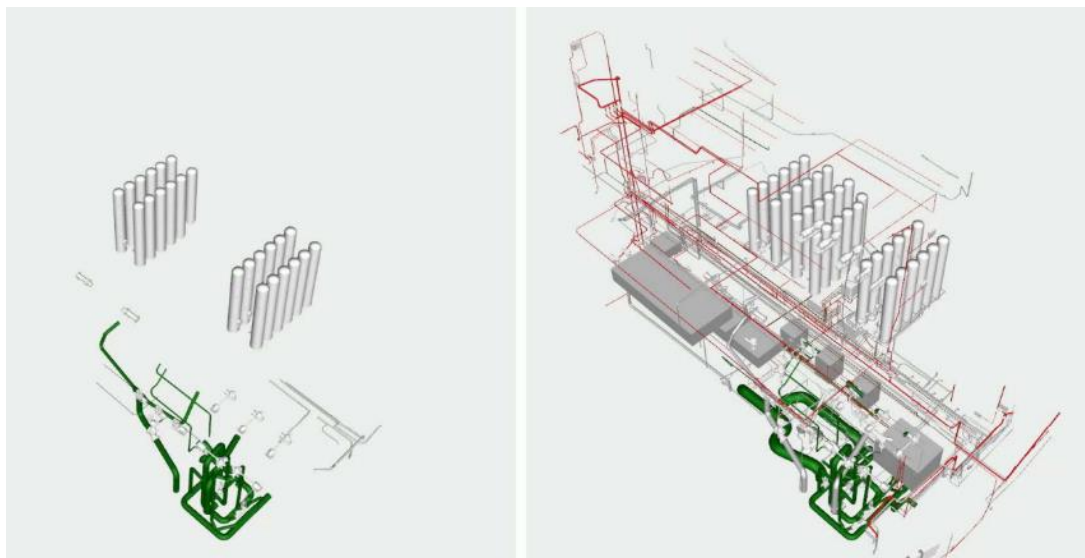


**Рисунок 2.** Сравнение трехмерной модели главного корпуса НВАЭС, выполненной по документации (красный цвет), и модели, откорректированной по результатам лазерного сканирования и сферического фотографирования (зеленый цвет); расхождения охватывают трубопроводные трассы, опорные конструкции и технологическое оборудование

**Figure 2.** Comparison of the 3D model of the Novovoronezh NPP, main building constructed from documentation (in red) and the model corrected based on laser scanning and spherical photography results (in green); discrepancies cover pipeline routes, support structures and process equipment

Масштаб выявленных расхождений оказался значительным. В главном корпусе энергоблоков № 1 и 2 НВАЭС занижение массы металлических конструкций в традиционном реестре составило 45 %, что в абсолютном выражении соответствует примерно 5600 тоннам неучтенного металла. Значительные расхождения зафиксированы более чем в 20 % обследованных помещений.

Сравнение по отдельному помещению насосов промежуточного контура А062/1 (рис. 3) иллюстрирует типичный характер выявленных отклонений: при суммарной массе по реестру около 200 тонн данные ЦИИРМ дают около 140 тонн, причем распределение по категориям принципиально иное – ряд категорий (трубопроводы, кабель, воздуховоды) в традиционном реестре не учтены вовсе.



**Рисунок 3.** Сравнение трехмерной модели, построенной по проектной документации (слева), и модели, построенной по результатам НЛС (справа)

**Figure 3.** Comparison of the 3D model constructed from design documentation (left) and the model built from TLS data (right)

По итогам разработки ЦИИРМ установлено, что достаточность и актуальность исходной документации для целей инженерного анализа составляет не более 50 %. Иными словами, половина информации, необходимой для достоверной оценки состояния объекта, в традиционной документации отсутствует или недостоверна. Этот вывод, сделанный применительно к задачам вывода из эксплуатации давно работавшего объекта, применим и к задачам ПНР на строящихся АЭС: расхождение между проектной документацией и фактически смонтированным оборудованием возникает в процессе строительства, существует на момент начала ПНР и сохраняется на всем протяжении жизненного цикла станции.

Таким образом, опыт НВАЭС методологически дополняет опыт Ростовской АЭС. Если Ростовская АЭС показала, что НЛС применим в условиях продолжающегося

строительства и позволяет восстановить информационную модель, то НВАЭС дает количественную оценку того, насколько документация расходится с реальностью и к каким последствиям это расхождение приводит при инженерном анализе. Следующий шаг – применение НЛС для решения конкретной расчетной задачи непосредственно в ходе ПНР – был сделан при работах на БелАЭС.

### Опыт применения НЛС на Белорусской АЭС

При вводе в эксплуатацию энергоблока № 2 БелАЭС на подэтапах «испытания и опробования оборудования» и «холодно-горячая обкатка реакторной установки» [6] персоналом АО «Атомтехэнерго» был выполнен значительный объем работ по применению технологии НЛС к задачам подтверждения устойчивости оборудования си-

стем, важных для безопасности, к сейсмическим воздействиям [7]. В рамках этих работ было выполнено сканирование помещений и оборудования здания паровой камеры 20UJE, здания безопасности 20UKD и обстройки 20УКА.

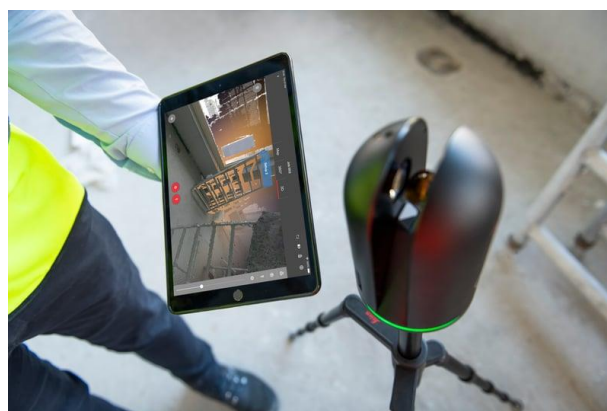
Наиболее показательным примером стала работа по обоснованию сейсмостойкости рециркуляционной охлаждающей установки 20KLG11, находящейся в помещении 20UKD. Для построения адекватной расчетной конечно-элементной модели требовалось внести в имеющуюся проектную документацию данные о фактическом положении и конструкции элементов крепления установки после монтажа, так как без достоверной информации о конфигурации узлов крепления невозможно корректно задать граничные условия в расчетной модели.

Некорректная постановка граничных условий приводит к недостоверным результатам расчета – в данном случае к неверной оценке сейсмостойкости. Альтернативой сканированию в этой ситуации было либо длительное комиссионное обследование установки, либо введение консервативных (завышенных) допущений о жесткости крепления, что могло привести к неудовлетворительному результату расчета.

На БелАЭС использовался компактный трехмерный сканер Leica BLK360 в комплекте с планшетным компьютером Apple iPad Pro (рис. 4) и программным обеспечением Leica Cyclone FIELD 360 для управления съемкой непосредственно на объекте. Точность определения координат зависит от типа прибора, расстояния до объекта и условий съемки. Для приборов класса Leica BLK360 паспортная точность составляет 4-7 мм на расстоянии до 20 метров. Для задач, связанных с верификацией положения крупного оборудования и его крепежных элементов, такая точность является достаточной. Камеральная обработка – объединение результатов отдельных станций в единое облако точек, привязка к системе координат и экспорт данных – выполнялась в программе Leica Cyclone REGISTER 360. Для дальнейшей работы с облаком точек использовался программный комплекс ReClouds, обеспечива-

ющий возможность построения трехмерных моделей по данным сканирования.

Сканер Leica BLK360 позволяет работать как в полной темноте, так и при ярком освещении; диапазон рабочих температур составляет от +5 до +40 °С. Прибор допускает выполнение сферического панорамного фотографирования и термографической съемки. Скорость сканирования – 360 000 точек в секунду, что при типовых настройках детализации обеспечивает время одного сканирования порядка 7-10 минут.



**Рисунок 4.** Лазерный сканер Leica BLK360 в комплекте с планшетом Apple iPad Pro (первоисточник: Leica Geosystems)<sup>3</sup>

**Figure 4.** Leica BLK360 laser scanner with Apple iPad Pro tablet (original: Leica Geosystems)<sup>3</sup>

Помещение здания 20UKD с рассматриваемой установкой было отсканировано с 57 станций. Время сканирования одной станции – от 7 минут. При использовании штатного комплекта аккумуляторов реальная производительность составила от 10 до 20 станций в день, что соответствует полевому этапу продолжительностью 3-6 дней. Сшивка облака точек (объединение результатов всех 57 станций в единое облако в общей системе координат, рис. 5) заняла около одного рабочего дня.

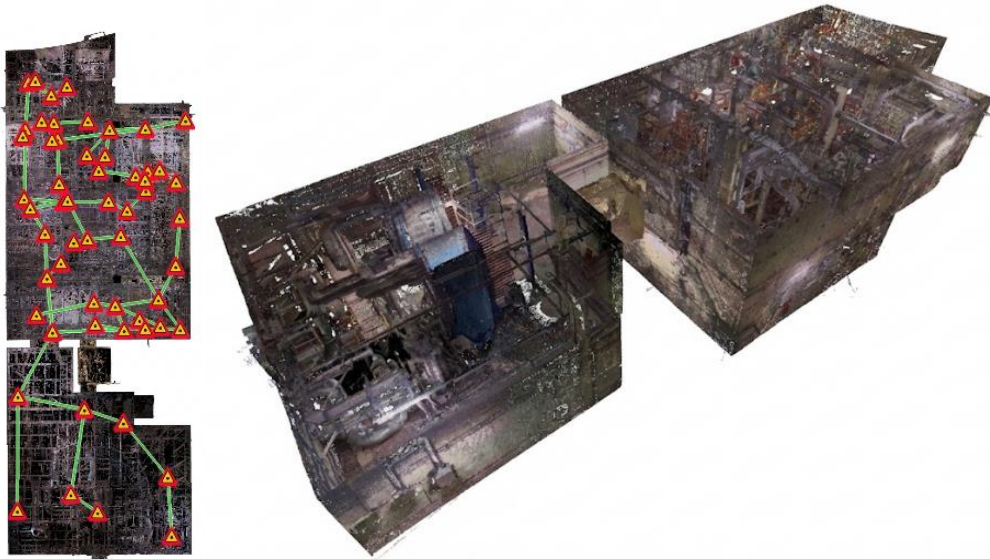
Полученное облако точек содержало детальное трехмерное изображение всего помещения, включая саму установку 20KLG11, все элементы ее крепления к строительным конструкциям, прилегающие трубопроводы и кабельные трассы. Из облака точек были

<sup>3</sup> Первоисточник: Leica Geosystems: <https://leica-geosystems.com/> (дата обращения: 26.03.2026).

извлечены трехмерные изображения оборудования (рис. 6), позволившие однозначно идентифицировать тип, количество и геометрию крепежных элементов.

На основе данных, извлеченных из облака точек, была построена актуальная конечно-

элементная модель установки 20KLG11 в программном комплексе ANSYS (рис. 7). Модель учитывала фактическую конфигурацию крепления, а не принятые в проектной документации упрощения.



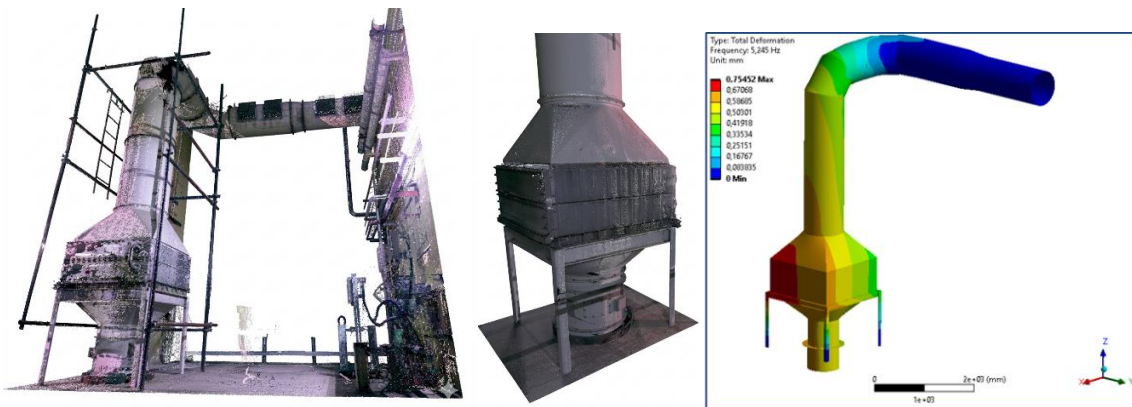
**Рисунок 5.** Помещение здания 20UKD энергоблока № 2 Белорусской АЭС. Сшивка результатов сканирования 57 станций

**Figure 5.** Building 20UKD room, Unit No. 2 of Belarusian NPP. Registration of 57 scanning stations results



**Рисунок 6.** Трехмерное изображение оборудования, полученное из облака точек

**Figure 6.** Three-dimensional image of equipment extracted from the point cloud



**Рисунок 7.** Расчетная конечно-элементная модель установки 20KLG11AN/AC002, построенная по данным лазерного сканирования, и результаты анализа деформаций

**Figure 7.** Finite element model of unit 20KLG11AN/AC002 built according to the laser scanning data, and deformation analysis results

Проведенный модальный анализ позволил определить собственную частоту колебаний установки, которая составила 5,245 Гц, что соответствует результатам натурных динамических испытаний. Дополнительно был выполнен анализ полных деформаций при сейсмическом воздействии. Результаты расчета подтвердили сейсмостойкость установки в соответствии с нормативными требованиями.

Принципиально важным является следующее: данный результат был получен без задержки графика пусконаладочных работ. Сканирование как бесконтактный и быстрый метод не потребовало остановки или ограничения других работ в помещении. Камеральная обработка и расчет были выполнены дистанционно, без повторных выходов в помещение.

Сопоставление трех описанных случаев применения НЛС позволяет выделить три принципиально разных способа использования данной технологии на ядерных объектах.

На Ростовской АЭС облако точек использовалось как исходный материал для создания полной векторной (твердотельной) модели объекта. Это трудоемкий путь (23 человеко-дня только на моделирование), дающий на выходе полноценную трехмерную модель фактического состояния объекта. Такой подход оправдан, когда требуется систематическая работа с моделью на протяжении длительного времени.

На БелАЭС облако точек использовалось напрямую – как источник геометрических данных для конкретного инженерного расчета. Полная твердотельная модель не создавалась; из облака извлекались лишь те параметры, которые требовались для задачи обоснования сейсмостойкости. Этот путь существенно менее трудоемок и позволяет получить практический инженерный результат в сжатые сроки.

На НВАЭС результаты лазерного сканирования использовались для систематической верификации всей имевшейся документации и выявления ее полноты. Итогом стала ЦИИРМ – комплексная модель, объединяющая инженерные и радиационные данные.

Этот подход наиболее трудоемок из трех, поскольку предполагает полное переосмысление и перестройку документальной базы объекта, однако дает наиболее исчерпывающую информационную основу для последующих этапов жизненного цикла. Выбор между тремя подходами определяется постановкой задачи. Если требуется исчерпывающая документация фактического состояния – необходима полная векторная или ЦИИРМ-модель. Если задача конкретна и ограничена (например, обоснование сейсмостойкости одной установки) – достаточно прямого использования облака точек. Это существенно влияет на трудоемкость и стоимость работ.

Облако точек, созданное при ПНР, не исчерпывает своей ценности после решения исходной задачи. Оно фиксирует состояние объекта на конкретный момент времени с высокой степенью детализации и полноты. В дальнейшем к нему можно обращаться для получения любых геометрических данных об объекте в том состоянии, в каком он был на момент съемки.

Это принципиально отличает облако точек от традиционной исполнительной документации: если при ручных обмерах фиксируются лишь те параметры, которые были предусмотрены программой обследования, то облако точек содержит трехмерные координаты всех видимых поверхностей. Любой вопрос о геометрии объекта, который может возникнуть впоследствии, уже имеет ответ в облаке точек – при условии, что соответствующая поверхность была видна хотя бы с одной станции сканирования.

### **Направления применения технологии НЛС в рамках ПНР**

Возможными направлениями применения технологии НЛС в рамках ПНР являются:

– предварительный визуальный осмотр помещений и оборудования. Панорамные изображения и облако точек, создаваемые сканером одновременно, позволяют провести детальный «виртуальный обход» помещения без физического присутствия в нем. Специалист может предварительно изучить состояние оборудования на экране компью-

тера, выявить очевидные несоответствия и сформулировать конкретные вопросы, требующие натурного осмотра, и лишь после этого целенаправленно выйти в помещение только к выявленным проблемным местам. Это сокращает время пребывания персонала в помещении и повышает эффективность осмотров;

– верификация опорно-подвесных систем трубопроводов. Фактическое положение и конструкция элементов крепления трубопроводов могут быть определены по данным облака точек и сопоставлены с проектными данными. Это позволяет выявлять отклонения, значимые для расчетов на сейсмические и динамические нагрузки;

– проверка зазоров. Расстояния между оборудованием, трубопроводами и строительными конструкциями, в том числе нормируемые антисейсмические зазоры, могут быть измерены по облаку точек с точностью, сопоставимой с точностью натурных замеров;

– обоснование сейсмостойкости оборудования. Как показал опыт БелАЭС, данные НЛС позволяют построить адекватную расчетную модель в тех случаях, когда проектная документация не содержит достаточных сведений о фактическом раскреплении оборудования;

– документирование состояния на момент приемки. Облако точек, созданное при ПНР, фиксирует исходное состояние объекта, от которого в дальнейшем можно отсчитывать любые изменения, будь то деформации, смещения оборудования или результаты модернизаций.

– подготовка к сдаточным испытаниям. Перед проведением испытаний, требующих натурного осмотра оборудования комиссиями, виртуальный тур по облаку точек позволяет подготовить перечень вопросов, требующих уточнения, и спланировать маршруты осмотра.

### **Возможное применение облака точек в ходе промышленной эксплуатации:**

– Плановые осмотры оборудования. Многие процедуры по техническому обслуживанию и надзору за состоянием оборудования предусматривают обязательный визуальный осмотр. Предварительное изучение

объекта по облаку точек позволяет сосредоточить внимание обходчика на конкретных элементах, вызывающих сомнения, и избежать избыточного времени пребывания в помещении.

– Подготовка к ремонту. При планировании ремонтных работ облако точек позволяет дистанционно уточнить геометрию рабочей зоны, подобрать необходимое оборудование и инструменты, спланировать маршруты доставки материалов. Это сокращает время подготовки и снижает риск непредвиденных затруднений при производстве работ.

– Проектирование модернизаций. При разработке проектов модернизации действующего оборудования облако точек служит актуальной геометрической основой, отражающей реальное, а не проектное состояние объекта. Это особенно важно для объектов, претерпевших существенные изменения в ходе эксплуатации.

– Мониторинг состояния строительных конструкций. Повторное сканирование через определенные интервалы времени позволяет выявлять деформации и смещения конструкций путем сравнения облаков точек, созданных в разное время.

– Поддержка расследования нештатных ситуаций. При возникновении нештатных ситуаций облако точек, созданное до их возникновения, может служить эталоном для оценки возможных изменений в состоянии оборудования или конструкций.

– Обучение персонала. Виртуальные туры по помещениям станции, созданные на основе панорамных изображений и облака точек, могут использоваться для подготовки персонала без необходимости физического присутствия на объекте.

– Дистанционные консультации специалистов. Облако точек и панорамные изображения позволяют специалистам конструкторских организаций проводить техническую экспертизу дистанционно – без командирования на объект. Вопрос, на проработку которого ранее требовалась организация выезда специалиста, может быть решен в ходе видеоконференции с демонстрацией трехмерной модели.

Таким образом, однажды созданное обла-

ко точек становится долгосрочным информационным активом, окупаемость которого растет по мере его использования для решения новых задач.

### **Условия рационального применения НЛС**

Опыт работ на Ростовской АЭС, НВАЭС и БелАЭС позволяет сформулировать условия, при которых применение НЛС является оправданным и эффективным:

- когда проектная документация не содержит достаточных данных о фактическом состоянии смонтированного оборудования для решения конкретной расчетной задачи (как в случае обоснования сейсмостойкости на БелАЭС);

- когда требуется верификация соответствия фактического состояния объекта проектной модели в рамках управления конфигурацией;

- когда необходимо создать геометрическую основу для проектирования модернизации или реконструкции;

- когда традиционные ручные обмеры технически затруднены из-за стесненности пространства, высотности объектов или их недоступности;

- когда требуется документирование состояния объекта на определенный момент времени с высокой детализацией и полнотой.

### **Возможные ограничения метода НЛС**

Ограничения использования метода НЛС могут быть связаны со стоимостью оборудования, трудоемкостью камеральной обработки, требованиями к квалификации персонала и ограничениями конкретного прибора по условиям съемки:

- Профессиональные лазерные сканеры относятся к дорогостоящему измерительному оборудованию. Сканер Leica BLK360, применявшийся на БелАЭС, относится к одному из наиболее доступных приборов своего класса, однако его стоимость тем не менее существенна. Приборы более высокого класса, такие как Leica ScanStation P20, использовавшиеся на Ростовской АЭС, стоят значительно дороже. Важно также учитывать, что стоимость оборудования не исчерпывает общих затрат на применение технологии: необходимо программное обеспечение для

обработки данных и расчетные мощности для работы с большими массивами данных.

- Как показал опыт Ростовской АЭС, создание полной векторной модели из облака точек является трудоемким процессом (23 человеко-дня для одного здания). Современное программное обеспечение предоставляет инструменты автоматического распознавания геометрических примитивов, однако моделирование остается преимущественно ручной работой. Этот факт необходимо учитывать при планировании сроков и бюджета.

- Как полевые работы по сканированию, так и камеральная обработка требуют специально подготовленных специалистов. Освоение современного программного обеспечения для работы с облаками точек требует времени и практики. Для организаций, не имеющих в штате таких специалистов, целесообразным может быть привлечение специализированного подрядчика.

- Применявшийся на БелАЭС сканер Leica BLK360 допускает работу только при температуре не ниже +5 °С и не допускает наличия высокого уровня запыленности. Для работ на открытом воздухе или в неотапливаемых помещениях в зимних условиях могут потребоваться приборы с расширенным температурным диапазоном.

Принципиально важно, что методология применения НЛС, описанная в настоящей работе, не привязана к конкретной марке оборудования: требования к съемке определяются характером инженерной задачи, а не производителем прибора. При выборе оборудования ключевым критерием является соответствие паспортной точности сканера допустимым погрешностям конкретной расчетной задачи, а также технические ограничения применяемого прибора по условиям съемки.

### **Перспективы применения на АЭС «Аккую»**

АЭС «Аккую» сооружается по тому же проекту ВВЭР-1200, что и энергоблок № 2 БелАЭС, на котором был получен описанный выше опыт применения НЛС. Это означает, что инженерные задачи, возникающие при ПНР, будут в значительной мере аналогичны тем, что решались на БелАЭС.

В частности, при вводе в эксплуатацию энергоблоков АЭС «Аккую» потребуется подтверждение сейсмостойкости оборудования систем, важных для безопасности. Сейсмические условия площадки АЭС «Аккую» характеризуются более высокими расчетными ускорениями по сравнению с площадкой БелАЭС, что придает задачам обоснования сейсмической безопасности повышенную значимость. Опыт применения НЛС для обоснования сейсмостойкости, полученный на БелАЭС, непосредственно применим к аналогичным задачам на АЭС «Аккую». Важным преимуществом является то, что необходимое оборудование и компетенции уже существуют. Применение НЛС при ПНР на АЭС «Аккую» может представлять собой тиражирование уже апробированного подхода на объект с аналогичными инженерными задачами.

Целесообразно рассмотреть возможность планового применения НЛС на тех этапах ПНР, которые предполагают обоснование сейсмостойкости оборудования: накопленный опыт показывает, что в ряде случаев проектная документация не содержит достаточных данных для корректной постановки расчетной задачи, и НЛС является наиболее эффективным способом восполнить этот пробел.

При проведении обязательных комиссионных осмотров помещений и оборудования предварительное ознакомление с объектом по данным сканирования позволяет повысить качество подготовки к осмотру и сократить его продолжительность.

Вопросы организации работ – выбор между выполнением сканирования собственными силами или с привлечением подрядчика, требуют отдельной проработки с учетом конкретных условий объекта.

## **Заключение**

1. НЛС является эффективным инструментом для решения конкретного класса инженерных задач: получения достоверных геометрических данных о фактическом состоянии объекта тогда, когда эти данные не могут быть извлечены из существующей документации.

2. Рассмотренный опыт трех объектов подтверждает это с разных сторон. Опыт НВАЭС показывает, что недостоверность традиционной документации действующего объекта может достигать 50 %; расхождение фактического и документального состояния системно и значительно. Опыт Ростовской АЭС показывает, что НЛС применим в условиях продолжающегося строительства и позволяет зафиксировать фактическое состояние объекта в сжатые сроки при минимальном вмешательстве в производственный процесс. Опыт БелАЭС демонстрирует, что данные сканирования могут быть непосредственно использованы для решения конкретной инженерной расчетной задачи – подтверждения сейсмостойкости – без создания полной твердотельной модели, что существенно сокращает трудоемкость и позволяет получить результат в рамках графика ПНР.

3. Полевая часть работ (собственно сканирование) во всех рассмотренных случаях характеризовалась высокой производительностью и минимальным влиянием на производственные процессы на объекте. Основная трудоемкость сосредоточена в камеральной обработке и определяется конечной целью: прямое использование облака точек для локальных измерений и построения расчетных моделей (БелАЭС) существенно менее трудоемко, чем создание полной векторной модели (Ростовская АЭС) или комплексной ЦИИРМ с радиационными атрибутами (НВАЭС).

4. Облако точек, созданное однажды, является долгосрочным информационным активом, применимым для широкого круга задач: от предварительного визуального осмотра и верификации проектных данных до планирования ремонтов, проектирования модернизаций и обучения персонала. Это обстоятельство существенно влияет на оценку эффективности затрат на проведение работ.

5. Применение НЛС при ПНР АЭС «Аккую» представляется целесообразным прежде всего для задач обоснования сейсмостойкости оборудования – по аналогии с опытом БелАЭС. Имеющиеся компетенции и оборудование позволяют рассматривать это как тиражирование апробированного подхода, а не внедрение новой технологии.

При этом опыт НВАЭС служит дополнительным обоснованием: он показывает, что расхождение между проектной документацией и реальным состоянием смонтированного

оборудования является закономерностью, а не исключением, и НЛС остается наиболее надежным способом его устранения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Morgan J., Mostafiz R.B., Friedland C. Development of a decision support tool for use of 3D terrestrial laser scanning for piping designs. *Frontiers in Built Environment*. 2025;11:1663869. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1663869>
2. Margaronis A., Tsoumas N., Georgantzoglou A., et al. Three-Dimensional Scanning-Based Retrofitting of Ballast Water Treatment Systems for Enhanced Marine Environmental Protection. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2026;14(2):154. <https://doi.org/10.3390/jmse14020154>
3. Zhong Z., Gu D., Dong X., Kong Q. 3D laser scanning technique and its application in China nuclear power plants. Proceedings of the 27th International Conference on Nuclear Engineering. *The Japan Society of Mechanical Engineers*, 2019. Session 1593. <https://doi.org/10.1299/jsmeicone.2019.27.1593>
4. Kirilak N. et al. Development and implementation of technical decision for digital support of construction using photogrammetry methods. *Nuclear Engineering and Design*. 2021;381:111366. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111366>
5. Shin J., Song J. Dismantling quantity estimation for nuclear power plant: scan-to-BIM versus conventional method. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2024;28(5):1607-1621. <https://doi.org/10.1007/s12205-024-0675-6>
6. Сааков Э.С., Рясный С.И. Ввод в эксплуатацию энергоблоков АЭС. Москва: Энергоатомиздат, 2007. 496 с. Режим доступа: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_003388718/?ysclid=mor7w2jmlb207883739](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_003388718/?ysclid=mor7w2jmlb207883739) (дата обращения: 26.03.2026).
7. Saakov E.S., Ryasny S.I. Commissioning of NPP power units. Moscow, Energoatomizdat, 2007. 496 p. (In Russ.). Available at: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_003388718/?ysclid=mor7w2jmlb207883739](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_003388718/?ysclid=mor7w2jmlb207883739) (accessed: 26.03.2026).
8. Сааков Э.С., Рясный С.И., Зайкин И.И. и др. Повышение эффективности расчетно-экспериментальной оценки сейсмостойкости оборудования АЭС с применением базы данных. *Атомная энергия*. 2015;118(3):137-141. Режим доступа: [https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya\\_t118-3\\_2015/p140/?ysclid=mor83c2iqj618476114](https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t118-3_2015/p140/?ysclid=mor83c2iqj618476114) (дата обращения: 26.03.2026).
9. Saakov E.S., Ryasny S.I., Zaikin I.I. et al. Improving the efficiency of computational and experimental assessment of seismic resistance of NPP equipment using a database. *Atomic Energy*, 2015;118(3):137-141. (In Russ.). Available at: [https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya\\_t118-3\\_2015/p140/?ysclid=mor83c2iqj618476114](https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t118-3_2015/p140/?ysclid=mor83c2iqj618476114) (accessed: 26.03.2026).

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Зайкин И.И.** – замысел и дизайн исследования в рамках работы в АО «Атомтехэнерго» на Белорусской АЭС, в том числе внедрение идеологии лазерного 3D сканирования в программы динамических испытаний оборудования, сбор и интерпретация публикаций по теме работы, подготовка текста статьи;

**Рясный С.И.** – критический пересмотр вариантов статьи в части значимого интеллектуального содержания, подготовка окончательного варианта статьи для опубликования;

**Булахтин К.В.** – руководство и разработка технологии лазерного 3D сканирования оборудования на Белорусской АЭС, обработка данных, построение облаков точек и конечно-элементных моделей оборудования, проведение модального анализа и анализа сейсмостойкости;

**Щугорев А.В.** – участие в разработке и внедрении идеологии лазерного 3D сканирования в программы ПНР Белорусской АЭС;

**Валеев Р.Ш.** – участие во внедрении идеологии лазерного 3D сканирования в программы ПНР в период работы на Белорусской АЭС, участие в подготовке текста статьи;

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Zaykin I.I.** – the idea and design of the research in the framework of work at Atomtekhenergo JSC at the Belarusian NPP, including the introduction of 3D laser scanning ideology into dynamic equipment testing programs, collection and interpretation of publications on the topic of the work, preparation of the text of the article;

**Ryasny S.I.** – critical revision of the versions of the article in terms of significant intellectual content, preparation of the final version of the article for publication;

**Bulakhtin K.V.** – management and development of 3D laser scanning technology for equipment at the Belarusian NPP, data processing, building point clouds and finite element models of equipment, conducting modal analysis and earthquake resistance analysis;

**Shchugorev A.V.** – participation in the development and implementation of 3D laser scanning ideology in the programs of the Belarusian NPP;

**Valeev R.Sh.** – participation in the introduction of 3D laser scanning ideology into the programs of the Belarusian NPP during the period of work at the Belarusian NPP, participation in the preparation of the text of the article;

**Карпенко Н.А.** – участие в подготовке текста статьи.

**ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:**

Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования

**БЛАГОДАРНОСТИ:**

Авторы выражают признательность специалистам Белорусской АЭС за техническое сопровождение и организационное обеспечение работ, в том числе при получении необходимых разрешений и согласований на допуск оборудования и персонала в помещения станции.

**КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:**

**Иван Игоревич Зайкин**, кандидат технических наук, эксперт, АО «Аккую Нуклеар», Гюльнар, Мерсин, Турецкая Республика.

e-mail: zaykin@hotmail.com

**Сергей Иванович Рясный**, доктор технических наук, профессор, НИУ «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: esp.izmailovo@mail.ru

**Константин Васильевич Булахтин**, начальник отдела сейсмической безопасности, АО «Атомтехэнерго», г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: kovbulakhtin@atech.ru

**Алексей Владимирович Щугорев**, кандидат технических наук, начальник управления диагностики, сейсмической безопасности и расчетного анализа, АО «Атомтехэнерго», г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: MGP@atech.ru

**Ринат Шамильевич Валеев**, заместитель технического директора по радиационной защите и обращению с радиоактивными отходами, АО «Аккую Нуклеар», Гюльнар, Мерсин, Турецкая Республика.

e-mail: info@akkuyu.com

**Николай Андреевич Карпенко**, начальник отдела надежности и анализа безопасности РУП «Белорусская АЭС», Республика Беларусь.

e-mail: karpenko89@gmail.com

**Karpenko N.A.** – participation in the preparation of the text of the article.

**FUNDING:**

The authors declare no external funding

**ACKNOWLEDGEMENTS:**

The authors express their gratitude to the specialists of the Belarusian NPP for the technical support and organizational support of the work, including in obtaining the necessary permits and approvals for the admission of equipment and personnel to the plant.

**CONFLICT OF INTEREST:**

The authors declare no conflict of interest.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:**

**Ivan I. Zaykin**, Cand. Sci. (Engin), expert, Akkuyu Nuclear JSC, Gulnar, Mersin, Republic of Turkey.

e-mail: zaykin@hotmail.com

**Sergey I. Ryasny**, Dr. Sci. (Engin), Professor, National Research University «MPEI», Moscow, Russian Federation.

e-mail: esp.izmailovo@mail.ru

**Konstantin V. Bulakhtin**, Head of the Seismic Safety Department, Atomtechenergo JSC, Moscow, Russian Federation.

e-mail: kovbulakhtin@atech.ru

**Aleksey V. Shchugorev**, Cand. Sci. (Engin), head of the Diagnostics, Seismic Safety, and Computational Analysis Department, Atomtechenergo JSC, Moscow, Russian Federation.

e-mail: MGP@atech.ru

**Rinat Sh. Valeev**, Deputy Technical Director for Radiation Protection and Radioactive Waste Management, Akkuyu Nuclear JSC, Gulnar, Mersin, Republic of Turkey.

e-mail: info@akkuyu.com

**Nikolai Andreevich Karpenko**, Head of the Reliability and Safety Analysis Department, SUE «Belarusian NPP», Republic of Belarus.

e-mail: karpenko89@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 27.03.2026

После доработки / Revision 15.05.2026

Принята к публикации / Accepted 19.05.2026

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

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-04>

УДК 621.791

EDN ENJUNС

Оригинальная статья / Original paper




**Исследование высокочастотного воздействия на свойства сварочной дуги**

**Е.С. Бурдаков<sup>1</sup> , С.М. Бурдаков<sup>2</sup>  , Н.Н. Подрезов<sup>2</sup> , Ю.В. Заяров<sup>2</sup> **

<sup>1</sup>Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, г. Волгодонск, Ростовская обл.,  
Российская Федерация

<sup>2</sup> Волгодонский инженерно-технический институт – филиал национального исследовательского ядерного  
университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация

 [SMBurdakov@mephi.ru](mailto: SMBurdakov@mephi.ru)






**Аннотация.** В статье представлены данные исследований дугового разряда при комбинированном питании сварочного контура от основного источника постоянного тока и в режиме с параллельно подключенным к нему дополнительным генератором. С помощью генератора происходит формирование вспомогательной квазигармонической компоненты питания частотой  $f_{к1} = 40000,0$  Гц при заданных режимах сварочного процесса покрытыми электродами. Сфера практического применения данного способа питания – атомно-энергетическое машиностроение, где он востребован для обеспечения качества сварных соединений стальных конструкций и изделий на всех этапах: от изготовления до монтажа и ремонта. Качество и прочность сварных швов, а также производительность при изготовлении изделий в машиностроении, в значительной мере определяются правильным выбором режимов сварки и свойствами дугового разряда как ключевого элемента сварочного контура. Исследование свойств дугового разряда представляет собой важную задачу особенно при ручной дуговой сварке в условиях монтажа и сборки. Оценка свойств сварочной дуги в исследовании осуществлялась по заданному набору критериев и их значений, полученных осциллограмм сварочного тока и напряжения, таких как: статистические параметры в виде коэффициентов вариации сварочного тока, напряжения, мощности. Параметров, связанных с короткими замыканиями: частота, их длительность, постоянная времени дуги. Также были учтены параметры, характеризующие динамику сигналов: амплитуда колебаний тока и напряжения, скорость изменения тока и напряжения. Проведенный анализ выявил улучшение свойств сварочной дуги и уменьшение инерции изменения ее электросопротивления в заданных режимах при комбинированном питании сварочного контура.

**Ключевые слова:** свойства дугового разряда, комбинированное питание, сварочный контур, атомно-энергетическое машиностроение, строительство, ручная дуговая сварка, сварочный контур, критерии, частота переноса, осциллограммы сварочного тока и напряжения

**Для цитирования:** Бурдаков Е.С., Бурдаков С.М., Подрезов Н.Н., Заяров Ю.В. Исследование высокочастотного воздействия на свойства сварочной дуги. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(2):41-48. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-04>


**For citation:** Burdakov E.S., Burdakov S.M., Podrezov N.N., Zayarov Yu.V. Study of high frequency impact on welding arc properties. *Nuclear Safety*. 2026;16(2):41-48. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-04>

**Study of high frequency impact on welding arc properties**

**Evgenij S. Burdakov<sup>1</sup> , Sergey M. Burdakov<sup>2</sup>  , Nikolaj N. Podrezov<sup>2</sup> ,**  
**Yuriy V. Zayarov<sup>2</sup> **

<sup>1</sup>«Атоммаш» the branch of «АЭМ-technologies» JSC in Volgodonsk, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation

<sup>2</sup> Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,  
Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation

 [SMBurdakov@mephi.ru](mailto: SMBurdakov@mephi.ru)

**Abstract.** The article presents the data of arc discharge studies with combined power supply of the welding circuit from the main DC source and in the mode with an additional generator connected to it in parallel. The generator is used to form an auxiliary quasi-harmonic power supply component with frequency  $f_{k1} = 40000.0$  Hz under given welding process conditions with coated electrodes. The scope of practical application of this method of feeding is nuclear power engineering, where it is in demand to ensure the quality of welded joints of steel structures and products at all stages: from manufacture to installation and repair. The quality and strength of welds, as well as the productivity in the manufacture of products in mechanical engineering, are largely determined by the correct choice of welding modes and the properties of arc discharge as a key element of the welding circuit. The study of arc discharge properties is an important task especially for manual arc welding under installation and assembly conditions. The properties of the welding arc in the study were evaluated according to a given set of criteria and their values, obtained oscillograms of the welding current and voltage, such as: statistical parameters in the form of coefficients of variation of the welding current, voltage, power. Parameters related to short circuits: frequency, their duration, arc time constant. Parameters characterizing the dynamics of signals were also taken into account: the amplitude of current and voltage fluctuations, the rate of change in current and voltage. The analysis revealed an improvement in the properties of the welding arc and a decrease in the inertia of changing its electrical resistance in given modes with combined power supply of the welding circuit.

**Keywords:** arc discharge properties, combined power supply, welding circuit, nuclear power engineering, construction, manual arc welding, welding circuit, criteria, transfer frequency, welding current and voltage oscillograms

## Введение

Интенсификация темпов производства и модернизации в машиностроительном комплексе Российской Федерации, особенно в сегменте тяжелого атомно-энергетического и тепломеханического оборудования, выдвигает на первый план вопросы гарантированной долговечности и надежности сварных соединений. В контексте ремонта и монтажа оборудования, атомных и тепловых станций (паровых котлов, турбоагрегатов, систем магистральных трубопроводов высокого давления) ручная дуговая сварка покрытыми электродами сохраняет статус критически важной, а зачастую и безальтернативной технологии. Ее применение в сборочно-монтажных условиях, непосредственно на объекте, и цеховых условиях для наплавки изношенных элементов роторов, заварки трещин в корпусах аппаратов, трубопроводов, монтажа камер сгорания и пароперегревателей сопряжено с повышенными рисками, обусловленными сложной пространственной компоновкой, ограниченным доступом к зоне сварного соединения.

В этих условиях свойства сварочной дуги становятся определяющим фактором, непосредственно формирующим служебные характеристики сварного соединения. Нестабильное горение дуги приводит к ряду взаимосвязанных дефектообразующих факторов: нарушение теплового цикла сварки, металлургических процессов. Кроме того, хаотич-

ные короткие замыкания и крупнокапельный перенос, характерные для нестабильной дуги, увеличивают разбрызгивание и способствуют неравномерности проплава. При ремонте тонкостенных труб поверхностных нагревателей или выполнении корневых проходов многослойных швов это напрямую ведет к необходимости трудоемкой зачистки и повышенному риску непроваров, недопустимых в герметичных системах, работающих под давлением в сотни атмосфер [1].

Таким образом, целенаправленное исследование свойств дуги и разработка методов их повышения, это системное решение для улучшения в конечном итоге ресурса сварных соединений в ответственных узлах энергооборудования [2]. Перспективным направлением, напрямую вытекающим из этих исследований, является внедрение систем питания нового поколения с расширенным функционалом микроэлектронной базы. Такие источники способны не только компенсировать колебания длины дуги, но и динамически стабилизировать тепловложение, перенос металла при формировании сварного шва [3,4].

## Методы исследования

Основной целью представленной работы является определение воздействия накладываемого вспомогательного напряжения  $U_{QPS40} = 80,0$  В, частотой  $f_{QPS40} = 40000,0$  Гц на свойства дуги постоянного тока, их оцен-

ка в разных режимах сварочного процесса на основе ее определенных критериев.

Выполнена оценка при питании сварочного контура от источника постоянного тока ВДУ-504 и в режиме с параллельно подключенным к нему дополнительным генератором.

Применяемый в составе цифровой системы для измерения электрических параметров исследуемого контура генератор, формирует специальный высокочастотный квазигармонический сигнал QPS40 по напряжению, переменной частоты для подачи на сварочную дугу [5]. Эксперименты проводились по методике, представленной в литературных источниках [5,6], в нижнем положении сварочной ванны на пластине из стали (Ст3) толщиной  $\delta = 10$  мм, в режимах 100, 120, 140 А, с QPS40 и без, электроды марки УОНИИ 13/45,  $\varnothing 3$  мм.

### Результаты проведенных исследований

Свойства сварочной дуги оценивались на основе обработки осциллограмм сварочного тока и напряжения. Для количественной оценки использовался следующий набор критериев и их значений, описанных далее. Коэффициенты вариации:  $KV(I_{св.i})$  – сварочного тока,  $KV(U_{д.i})$  – напряжения [7],  $KV(P_i)$  – мощности. Так же использованы параметры, связанные с короткими замыканиями:  $f_{к.з.}$  – частота коротких замыканий, их  $\tau_{к.з.}$  – длительность,  $\theta_{дт}$  – постоянная времени. Были учтены параметры, характеризующие динамику и форму сигналов: амплитуда колебаний тока и напряжения ( $\Delta I$ ,  $\Delta U$ ), которые определялись как размах между минимальным и максимальным значением. Использовали такие параметры как скорость изменения тока и напряжения соответственно,  $dI(t) = dI_{св.i}/dt$ ,  $dU(t) = dU_{д.i}/dt$ . Резкие скачки зависимости могут указывать на резкий, взрывной характер переноса металла, вызывая его повышенное разбрызгивание.

Функция  $dI(t)$  обуславливает способность источника питания изменять ток в сварочном контуре. Она определяется индуктивностью сварочного контура, напряжением холостого хода и быстродействием силовой электроники источника. Функция  $dI(t)$  влияет значительно на время отрыва

капли и формирование пинч-эффекта, определяет скорость нарастания тока при коротком замыкании.

Зависимость  $dU(t)$  играет большую роль в быстродействии системы регулирования при изменении длины дуги. Она характеризует способность источника восстанавливать напряжение после короткого замыкания и может быть использована для оценки состояния стабилизации длины дуги при возмущениях, а так же вероятности обрывов дуги.

Постоянная времени дуги  $\theta_{дт}$  – это время, за которое степень ионизации плазмы и, соответственно, проводимость столба дуги изменяются при скачкообразном изменении тока. Другими словами:  $\theta_{дт}$  является мерой инерционности плазмы. Она зависит от сварочного тока и скорости его изменения, степени турбулентности плазмы, типа источника питания и динамики сварочного контура [8,9].

Для расчета значений выбранных критериев устойчивости дуги были обработаны осциллограммы сварочного тока и напряжения с использованием РТС©Mathcad. Исходя из этого, формировались зависимости мощности дугового разряда, скоростей изменения сварочного тока и напряжения от времени проведения их замера, что показано на рисунке 1.

В стандартном режиме  $I_{св.i} = 100,0$  А, были рассчитаны заявленные критерии устойчивости:

$$\begin{aligned}KV(I_{св.i}) &= 18,823 \% ; \\KV(U_{д.i}) &= 15,254 \% ; \\KV(P_i) &= 14,288 \% ; \\f_{к.з.} &= 2 \text{ Гц} ; \\\tau_{к.з.} &= 0,022 \text{ с} ; \\\Delta U &= 24,762 \text{ В} ; \\\Delta I &= 163,529 \text{ А} ; \\\theta_{дт} &= 5,0 \times 10^{-2} \text{ с} ; \\dI(t) &= 8,564 \times 10^3 \text{ А/с} ; \\dU(t) &= 1,512 \times 10^3 \text{ В/с} .\end{aligned}$$

В режиме 100 А с использованием QPS:

$$\begin{aligned}KV(I_{св.i}) &= 21,782 \% ; \\KV(U_{д.i}) &= 14,23 \% ; \\KV(P_i) &= 15,543 \% ; \\f_{к.з.} &= 4 \text{ Гц} ; \\\tau_{к.з.} &= 0,018 \text{ с} ; \\\Delta U &= 17,905 \text{ В} ;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta I &= 147,5 \text{ A}; \\ \theta_{Дт} &= 2,334 \times 10^{-3} \text{ с}; \\ dI_3(t) &= 1,475 \times 10^5 \text{ A/с}; \\ dU_3(t) &= 4,209 \times 10^4 \text{ В/с}.\end{aligned}$$

В стандартном режиме  $I_{св.и} = 120 \text{ A}$ :

$$\begin{aligned}KV(I_{св.и}) &= 15,408 \text{ \%}; \\ KV(U_{д.и}) &= 15,187 \text{ \%}; \\ KV(P_i) &= 11,684 \text{ \%}; \\ f_{к.з.} &= 2,4 \text{ Гц}; \\ \tau_{к.з.} &= 0,025 \text{ с}; \\ \Delta U &= 24,8193 \text{ В}; \\ \Delta I &= 148,815 \text{ A}; \\ \theta_{Дт} &= 2,8 \times 10^{-2} \text{ с}; \\ dI_3(t) &= 6,888 \times 10^3 \text{ A/с}; \\ dU_3(t) &= 1,326 \times 10^3 \text{ В/с}.\end{aligned}$$

При 120 А (QPC):

$$\begin{aligned}KV(I_{св.и}) &= 18,233 \text{ \%}; \\ KV(U_{д.и}) &= 13,628 \text{ \%}; \\ KV(P_i) &= 11,366 \text{ \%}; \\ f_{к.з.} &= 4,286 \text{ Гц}; \\ \tau_{к.з.} &= 0,022 \text{ с}; \\ \Delta U &= 19,629 \text{ В}; \\ \Delta I &= 126,67 \text{ A}; \\ \theta_{Дт} &= 1,037 \times 10^{-3} \text{ с};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}dI_3(t) &= 1,649 \times 10^5 \text{ A/с}; \\ dU_3(t) &= 3,711 \times 10^4 \text{ В/с}.\end{aligned}$$

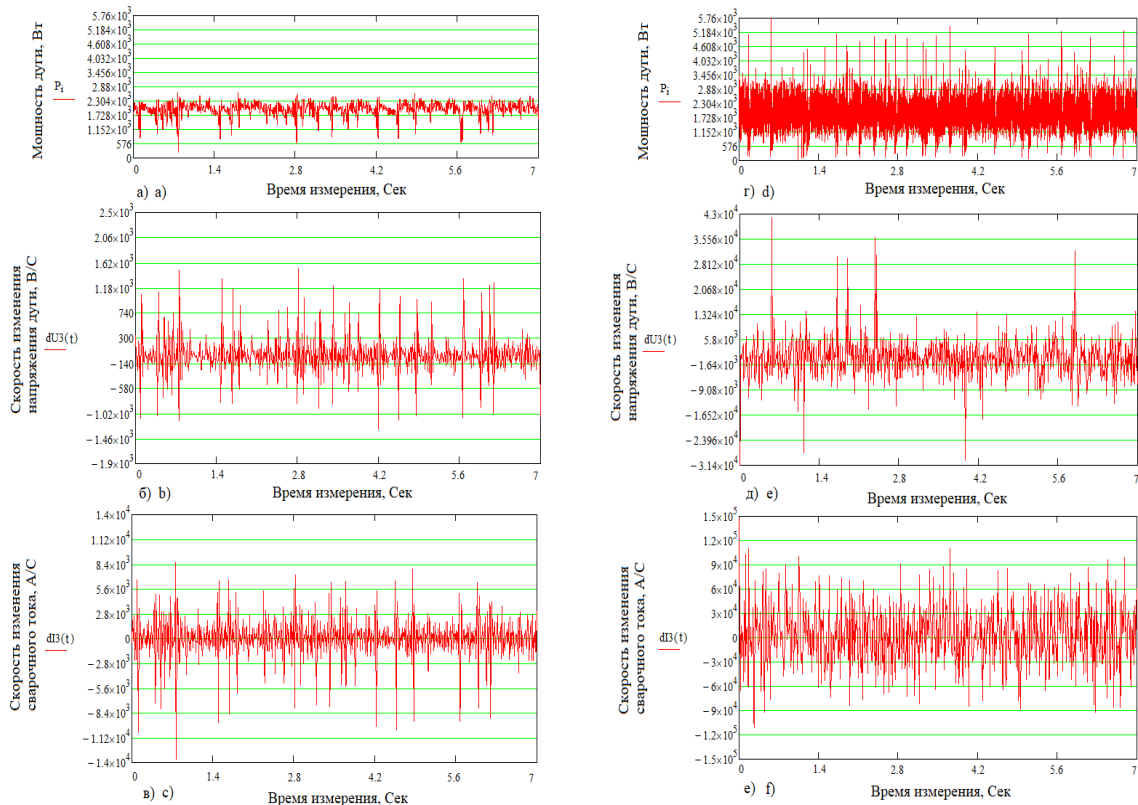
В стандартном режиме 140А:

$$\begin{aligned}KV(I_{св.и}) &= 12,723 \text{ \%}; \\ KV(U_{д.и}) &= 14,211 \text{ \%}; \\ KV(P_{д.осц}) &= 9,2 \text{ \%}; \\ f_{к.з.} &= 4 \text{ Гц}; \\ \tau_{к.з.} &= 0,022 \text{ с}; \\ \Delta U &= 19,021 \text{ В}; \\ \Delta I &= 98,93 \text{ A};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\theta_{Дт} &= 2,3 \times 10^{-2} \text{ с}; \\ dI_3(t) &= 4,422 \times 10^3 \text{ A/с}; \\ dU_3(t) &= 9,19 \times 10^2 \text{ В/с}.\end{aligned}$$

При 140 А (QPC):

$$\begin{aligned}KV(I_{св.и}) &= 15,672 \text{ \%}; \\ KV(U_{д.и}) &= 13,567 \text{ \%}; \\ KV(P_i) &= 9,95 \text{ \%}; \\ f_{к.з.} &= 4,571 \text{ Гц}; \\ \tau_{к.з.} &= 0,018 \text{ с}; \\ \Delta U &= 19,629 \text{ В}; \\ \Delta I &= 97,85 \text{ A}; \\ \theta_{Дт} &= 8,102 \times 10^{-3} \text{ с}; \\ dI_3(t) &= 1,086 \times 10^5 \text{ A/с}; \\ dU_3(t) &= 3,564 \times 10^4 \text{ В/с}.\end{aligned}$$



**Рисунок 1.** Зависимости мощности дугового разряда от времени протекания сварки: а, б, в – стандартный режим 100А; г, д, е – режим 100А с QPC40.

**Figure 1.** Dependence of arc discharge power on welding time: а, б, в – standard 100А mode; д, е, ф – 100А mode with QPC40

## Заключение

Стандартные режимы соответствуют классическому крупнокапельному переносу, реализуемому на источниках с естественной внешней характеристикой. Крупная капля металла формируется, примерно 0,5 сек, затем замыкает ванну, на 0,022 сек, отрывается. Перенос имеет инерционный характер. Исходя из анализа  $KV(I_{св.i})$ ,  $KV(U_{д.i})$  эти режимы характеризуются умеренной стабильностью тока, пониженной стабильностью напряжения. Повышенная амплитуда тока короткого замыкания и напряжения на дуге увеличивает риск разбрызгивания металла. В этих режимах, исходя из величин  $dI_3(t)$ ,  $dU_3(t)$  доминирует инерционная стабилизация тока и напряжения. Низкие скорости изменения параметров обеспечивают малую чувствительность к высокочастотным возмущениям и высокое постоянство средних значений  $KV(I_{св.i})$ , однако ограничивают частоту переноса и обуславливают крупнокапельный характер переноса с повышенным разбрызгиванием. Зафиксированы пониженные значения  $\theta_d$ , что соответствует высокой инерционности плазменного столба. Физический смысл здесь раскрывается через сопоставление  $\theta_d$  с длительностью коротких замыканий. Здесь  $\theta_d$  больше  $\tau_{к.з.}$ , следовательно, ионизационное состояние плазмы за время существования жидкой перемычки не успевает подстроиться под изменяющиеся электрические параметры. Дуга реагирует на короткое замыкание с запозданием, процесс переноса металла носит инерционный, квазистатический характер.

В сварочных режимах с использованием QPS40 демонстрируются признаки увеличенного переноса металла. Несмотря на несколько более высокий коэффициент вариации тока, данный режим обеспечивает лучшее качество формирования шва [10], минимальное разбрызгивание и технологические возможности сварки благодаря высокой частоте и малой длительности коротких замыканий. Можно сказать в данном случае реализуется динамическая стабилизация тока и напряжения сварочной дуги на основе форсированного пинч-эффекта с активным отрывом капли. Высокие скорости изменения тока и напряжения позволяют в два раза

увеличить частоту коротких замыканий, сократить их длительность и снизить амплитуду тока при одновременном улучшении стабильности напряжения. Таким образом, с позиций технологичности эти режимы предпочтительны, особенно при изготовлении ответственных изделий.

Коэффициент вариации мощности  $KV(P_i)$  показывает практически равную стабильность тепловложения в среднем. Однако пиковые показатели мощности выделяемой в сварочной дуге на стандартном режиме 100А:  $P_{св.100A} = 2,633 \cdot 10^3$  Вт и режиме 100 А с использованием QPS40  $P_{св.100A(QPS)} = 5,184 \cdot 10^3$  Вт. При этом разность значений максимальных импульсных мощностей по базовой и предлагаемой технологии составляет:  $\Delta_{св.реж.} = 2,551 \cdot 10^3$  Вт. При этом исследованные режимы принципиально различаются по динамике ввода этой мощности. Ввод энергии QPS40 в сварочную ванну происходит в виде ультразвуковых колебаний от генератора с вводимой в сварочную ванну энергией 7226 Дж.

В режимах с использованием QPS40 в дугу вводится мощность с частотой переноса металла в 2 раза выше, чем в стандартных режимах и более мелкими порциями. Под воздействием электромагнитного воздействия QPS40 происходит двукратное измельчение структуры кристаллизующегося металла, что свидетельствует о его влиянии на технологические свойства дуги. В данном случае QPS40 способствует возникновению кавитационного режима в ограниченном поверхностном слое заданной толщины жидкой фазы металла сварочной ванны. 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 переохлажденного металла, что ведет к появлению новых центров кристаллизации, что ведет к образованию мелкозернистой структуры сварного шва. Такое сварное соединение характеризуется более высокими показателями ударной вязкости [10].

Исследования подтвердили, что ни один параметр в отдельности не является достаточным критерием для оценки свойств дугового разряда. Только системное рассмотрение всего комплекса: коэффициентов вариации  $KV(I_{св.i})$ ,  $KV(U_{д.i})$ ,  $KV(P_i)$ , характеристик:  $f_{к.з.}$ ,  $\tau_{к.з.}$ ,  $\Delta I$ ,  $\Delta U$ , динамических показателей:  $dI_3(t)$ ,  $dU_3(t)$  и, в особенности  $\theta_{д.}$ , как параметра инерционности плазмы, с учетом физической модели дугового разряда, позволяет корректно классифицировать режим, прогнозировать структуру сварного соединения и обоснованно выбирать оборудование под конкретную производственную задачу.

Полученные результаты с модифицированными режимами демонстрируют, что постоянная времени и скорость изменения тока и напряжения являются не просто улучшенными числовыми показателями, а маркерами перехода на принципиально иной техно-

логический уровень. Оборудование, способное реализовать такие режимы, обеспечивает не количественное, а качественное преимущество: оно превращает ручную дуговую сварку из искусства, основанного на многолетнем опыте, в воспроизводимый, контролируемый, сертифицируемый технологический процесс с предсказуемыми металлургическими и механическими результатами.

Для предприятий теплового и энергетического машиностроения, ремонтных служб и монтажных организаций внедрение режимов с минимальной постоянной времени дуги и высокими динамическими характеристиками может обеспечить: повышение конкурентоспособности; снижение эксплуатационных затрат за счет увеличения ресурса сварных соединений; технологическую независимость и импортозамещение в сегменте высококачественного сварочного оборудования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Хромченко Ф.А. Надежность сварных соединений труб котлов и паропроводов. Москва: Энергоиздат, 1982. 120 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001115162?ysclid=mocu7o45zl297416202> (дата обращения: 16.02.2026).  
Khrunchenko F.A. Reliability of welded joints of boiler pipes and steam pipelines. Moscow: Energoizdat, 1982. 120c. (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001115162?ysclid=mocu7o45zl297416202> (accessed: 16.02.2026).
2. Скобцов И.Г., Дербин М.О. Оценка надежности сварных соединений стальных магистральных трубопроводов. *Инженерный вестник Дона*. 2025;6(126):584-594. Режим доступа: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2025/10121#top> (дата обращения: 16.02.2026).  
Skobtsov I.G., Derbin M.O. Assessment of reliability of welded joints of steel main pipelines. *Engineering Bulletin of the Don*. 2025;6(126):584-594. (In Russ.). Available at: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2025/10121#top> (accessed: 16.02.2026).
3. Уваров А.Ф. Транзисторный инверторный источник питания для импульсной дуговой сварки. *Сварочное производство*. 1988;10:25-26. Режим доступа: по запросу в редакцию.  
Uvarov A.F. Transistor inverter power supply for pulsed arc welding. *Welding production*. 1988;10:25-26. (In Russ.). Available at: по запросу в редакцию.
4. Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н., Ленивкин В.А. Оборудование для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 80 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001273840?ysclid=mocuv9kka8846245767> (дата обращения: 16.02.2026).  
Dyurgerov N.G., Sagirov Kh.N., Lenivkin V.A. Equipment for pulse arc welding with a melting electrode. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 80 p. (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001273840?ysclid=mocuv9kka8846245767> (accessed: 16.02.2026).
5. 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. Режим доступа: <https://elcat.bntu.by/index.php?url=/notices/index/IdNotice:39771/Source:default> (дата обращения: 16.02.2026).  
Chernov A.V., Poletaev Yu.V., Kavrishvili Z.O., Burdakov S.M. Increasing the stability of arc combustion during welding with coated electrodes. Gorenje. *Welding production*. 2000;2:7-9. (In Russ.). Available at: <https://elcat.bntu.by/index.php?url=/notices/index/IdNotice:39771/Source:default> (accessed: 16.02.2026).
6. 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. Волго-

донск: ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2020. С. 63-66. ISBN 978-5-72622472-5. Режим доступа: <https://nps.viti-mephi.ru/ru/arhiv-konferencii/> (дата обращения: 16.02.2026).

Burdakov S.M., Chernov A.V., Tsuverkalova O.F., Zokirov K.D. Control of gas-dynamic characteristics of an arc discharge using a quasi-harmonic power supply component. Nuclear Energy Safety : abstracts of the XVI International Scientific and Practical Conference, November 12-13, 2020. Volgograd: VITI NRU MEPhI, 2020. pp. 63-66. ISBN 978-5-72622472-5. (In Russ.). Available at: <https://nps.viti-mephi.ru/ru/arhiv-konferencii/> (accessed: 16.02.2026).

7. 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: по запросу в редакцию.

Bukarov V.A. Ermakov S.S., Dorina T.A. Evaluation of arc welding stability from process oscillograms using statistical methods. *Welding production*. 1990;12:30-32. (In Russ.). Available at: по запросу в редакцию.

8. Бурдаков С.М., Цуверкалова О.Ф., Заяров Ю.В., Постой Л.В., Ткачев В.Г. Исследование критериев устойчивости дугового разряда на предельном режиме сварки покрытыми электродами. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(2):31-38. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-04> EDN: SMBSCO

Burdakov S.M., Tsuverkalova O.F., Zayarov Yu.V., Postoy L.V., Tkachev V.G. Arc stability study at the limit mode of welding with coated electrodes. *Global nuclear safety*. 2023;13(2):31-38. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-04> EDN: SMBSCO

9. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. Москва: Издательство иностранной литературы, 1961. 370 с. Режим доступа: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_006381938/?ysclid=mocvkov9c7599034679](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_006381938/?ysclid=mocvkov9c7599034679) (дата обращения: 16.02.2026).

Finkelburg Von W., Maecker H. Elektrische Bogen und thermisches Plasma (Handbuch der Physik. Bd. 22. 1956). Moscow: Publishing House of Foreign Literature, 1961. 370 p. (In Russ.). Available at: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_006381938/?ysclid=mocvkov9c7599034679](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_006381938/?ysclid=mocvkov9c7599034679) (accessed: 16.02.2026).

10. 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>

Burdakov S.M., Damaskina M.B., Zheletskiy D.I. Study of Welded Joint Metal Structure under Pulsed Impact on Arc Discharge. *Global nuclear safety*. 2021;11(1):38-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2021-01-04>

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Бурдаков Е.С.** – разработка теории, оборудования, проведение экспериментов, расчетов, выполнение анализа результатов экспериментов, разработка программного обеспечения, работа с нормативной документацией, литературой;

**Бурдаков С.М.** – разработка теории, оборудования, выполнение расчетов, планирование и проведение экспериментов, анализ результатов экспериментов, результатов расчетов, создание рукописи статьи;

**Подрезов Н.Н.** – выполнение математического анализа значений полученных критериев свойств дугового разряда, выполнение анализа результатов экспериментов;

**Заяров Ю.В.** – выполнение анализа результатов экспериментов, расчетов, статистический анализ результатов.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии финансовой помощи при проведении исследования

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляет об отсутствии конфликта интересов.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Евгений Сергеевич Бурдаков**, инженер-технолог по сварке. Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0003-3895-3405>

e-mail: konanxxxx@mail.ru

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Burdakov E.S.** - development of theory, equipment, experiments, calculations, analysis of experiment results, software development, work with regulatory documentation, literature;

**Burdakov S.M.** – development of theory, equipment, calculations, planning and conducting experiments, analysis of experiment results, calculation results, creation of an article manuscript;

**Podrezov N.N.** – performing mathematical analysis of the values of the obtained criteria for arc discharge properties, performing analysis of the results of experiments;

**Zayarov Yu.V.** – performing analysis of results of experiments, calculations, statistical analysis of results;

#### FUNDING:

The authors declare no external funding

#### CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare no conflict of interest.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Evgenij S. Burdakov**, welding process engineer, «Atomash» the branch of «AEM-technologies» JSC in Volgograd, Volgograd, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0003-3895-3405>

e-mail: konanxxxx@mail.ru

**Сергей Михайлович Бурдаков**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных производств, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

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

e-mail: SMBurdakov@mephi.ru

**Подрезов Николай Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроения и прикладной механики Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

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

e-mail: NNPodrezov@mephi.ru

**Юрий Владимирович Заяров**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой строительных производств, доцент кафедры строительных производств Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

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

e-mail: YVZayarov@mephi.ru

**Sergey M. Burdakov**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Construction Production Department, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

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

e-mail: SMBurdakov@mephi.ru

**Nikolaj N. Podrezov**, Cand. Sci. (Eng.), 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.

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

e-mail: NNPodrezov@mephi.ru

**Yuriy V. Zayarov**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Construction Production department, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

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

e-mail: YVZayarov@mephi.ru

Поступила в редакцию / Received 19.02.2026

После доработки / Revision 30.04.2026

Принята к публикации / Accepted 05.05.2026

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

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-05>

УДК 621.039.52

EDN HAJGGN

Оригинальная статья / Original paper



**Метод поверхностных моментов – новый способ решения уравнения переноса нейтронов с детальным описанием углового распределения**

А.А. Семенов , А.М. Субботин   
АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Российская Федерация  
 [yadfizik@yandex.ru](mailto:yadfizik@yandex.ru)

**Аннотация.** Целью данной работы является разработка подхода, позволяющего проводить расчеты переходных процессов в ядерных реакторах с сильными неоднородностями. В настоящее время ведется разработка реакторных установок для атомных станций малой мощности, которые будут применяться для обеспечения потребителей в труднодоступных регионах электроэнергией и теплом, развития удаленных промышленных кластеров и территорий, изолированных от централизованных энергосистем, и освоения месторождений полезных ископаемых, требующих стабильного и чистого источника энергии. Перспективные реакторные установки характеризуются сложными конструкциями ТВС и всей активной зоны из-за наличия дополнительных органов регулирования и новых систем компенсации избыточной реактивности. В работе исследуется новый метод проведения нейтронно-физических расчетов – метод поверхностных моментов. Анализ угловых распределений направлений движения нейтронов показал, что данный метод перспективен для расчетов систем с сильными неоднородностями. Ключевым отличием разрабатываемого метода поверхностных моментов является отдельное описание угловых зависимостей для двух направлений (по обе стороны от грани) в виде непрерывных функций. Изложены теоретические основы метода поверхностных моментов. Проведена оценка точности для модельных задач по сравнению с методом Монте-Карло. Максимальная погрешность расчета относительных скоростей реакции деления методом поверхностных моментов в представленных задачах составила 0,6%. Это более чем на порядок ниже, чем максимальная погрешность диффузионного приближения. Таким образом, показана возможность достижения высокой точности в пределах долей процента и подтверждена эффективность расчетов активных зон с сильными неоднородностями. Представленные результаты дают основание полагать, что метод поверхностных моментов может быть полезен для расчетов ВВЭР-С и реакторных установок АСММ.

**Ключевые слова:** перенос нейтронов, кинетическое уравнение Больцмана, крупносеточные методы, OpenMC, разрывные базисные функции.

**Для цитирования:** Семенов А.А., Субботин А.М.. Метод поверхностных моментов – новый способ решения уравнения переноса нейтронов с детальным описанием углового распределения. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(2):49-56. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-05>

**For citation:** Semenov A.A., Subbotin A.M. The surface moments method: a new approach to solve the neutron transport equation with a detailed description of angular distribution. *Nuclear Safety*. 2026;16(2):49-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-05>

**The surface moments method: a new approach to solve the neutron transport equation with a detailed description of angular distribution**

Andrey A. Semenov , Aleksandr M. Subbotin   
JSC «VNIAES», Moscow, Russian Federation  
 [yadfizik@yandex.ru](mailto:yadfizik@yandex.ru)

**Abstract.** The objective of this work is to develop an approach to analyze transients in nuclear reactors with strong heterogeneities. Currently, reactor plants for small modular reactors (SMRs) are being developed to provide consumers in remote regions with electricity and heat, foster the growth of isolated industrial clusters and territories, and facilitate the development of mineral deposits that require a stable and clean energy source. Advanced reactor designs feature complex configurations of fuel assemblies and cores due to additional control rods and new systems for excess reactivity compensation. This paper investigates a new approach called the surface moments method. The analysis of neutron angular distributions demonstrated that this method holds promise for analyzing systems with strong heterogeneities. The key difference of the surface moments method is a separate description of angular dependencies for two directions (on both sides of the interface) in the form of continuous functions. The theoretical foundations of the surface moments method are outlined. Its accuracy is evaluated against Monte Carlo simulations using model problems. The maximum error in calculating relative fission rates with the surface moments method for the presented problems was 0.6%. This is more than an order of magnitude lower than the maximum error of the diffusion approximation. Thus, the results demonstrate the feasibility of achieving high accuracy within a fraction of a percent and confirm the efficiency of analyzing cores with strong heterogeneities. The presented results give grounds to believe that the surface moments method can be useful for calculations of VVER-S and SMR.

**Keywords:** neutron transport, Boltzmann transport equation, coarse-mesh methods, OpenMC, discontinuous basis functions

## Введение

В настоящее время ведется разработка реакторных установок для атомных станций малой мощности, которые будут применяться для обеспечения потребителей в труднодоступных регионах электроэнергией и теплом, развития удаленных промышленных кластеров и территорий, изолированных от централизованных энергосистем, и освоения месторождений полезных ископаемых, требующих стабильного и чистого источника энергии.

Особенности, связанные с условиями эксплуатации таких энергоблоков, приводят к значительному усложнению конструкций ТВС и всей активной зоны из-за наличия дополнительных органов регулирования и новых систем компенсации избыточной реактивности.

Современными методами для проведения нейтронно-физических расчетов реакторных установок являются: диффузионное приближение, метод Монте-Карло,  $P_n$ -методы, метод вероятностей первых столкновений (ВПС). Целью данной работы является разработка подхода, позволяющего проводить расчеты переходных процессов в ядерных реакторах с сильными неоднородностями. Метод ВПС предназначен для расчетов ячеек в стационарном состоянии. Метод Монте-Карло позволяет проводить детерминистические расчеты, но требует значительных временных затрат. Поэтому обычно для таких задач используются  $P_n$ -методы, однако

известно, что на границах сред с резким изменением потока нейтронов могут возникать осцилляции (эффект Гиббса). Одним из способов пространственной дискретизации является метод матриц отклика, в котором угловая зависимость потока нейтронов на гранях ячейки описывается разложением по сферическим функциям. Ключевым отличием разрабатываемого метода поверхностных моментов является отдельное описание угловых зависимостей для двух направлений (по обе стороны от грани) в виде непрерывных функций.

Основное внимание в этой работе будет уделено полям энерговыделения, поскольку для решения большей части нейтронно-физических задач, связанных с реакторными установками, необходимо рассчитывать именно их.

Одной из основных сложностей, возникающих при подготовке сечений для основанных на групповом диффузионном приближении программных кодов (SKETCH-N [1], БИПР-8 [2]), является вычисление коэффициентов диффузии ячеек [3]. Более того, изменение коэффициентов диффузии отражателя приводит к значительным изменениям результатов расчета полей энерговыделения в активной зоне, поэтому иногда возникает необходимость вносить дополнительные поправки. При этом известно, что отклонения полей энерговыделения, вычисленных в двухгрупповом диффузионном приближении, от референсных значений мо-

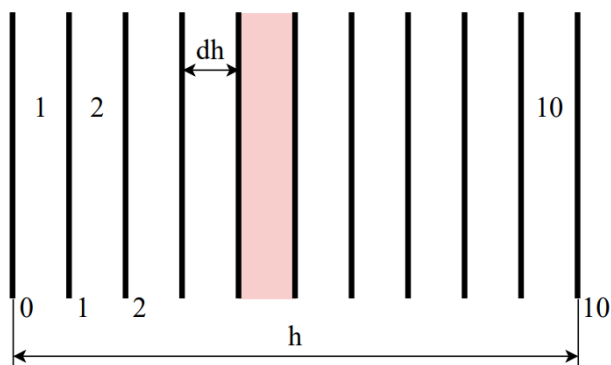
гут составлять порядка 5% [1].

### Особенности представления углового распределения потока нейтронов

В настоящее время для описания угловой зависимости потока нейтронов используется разложение по сферическим функциям различного порядка, например, в диффузионном приближении – до 1 порядка, в методе поверхностных гармоник (МПГ) [4] – до 2 и более высоких. В данной работе проведена оценка того, насколько хорошо такое приближение воспроизводит угловые распределения направлений движения нейтронов в областях сильных неоднородностей свойств активной зоны. Также предложен новый метод для проведения расчетов, напрямую учитывающий наличие разрывов в угловом распределении потока нейтронов.

Для получения угловых распределений направлений движения нейтронов на гранях моделировалась система с сильной неоднородностью, вызванной сильным поглотителем.

Геометрия задачи, изображенная на рисунке 1, представляет собой активную зону толщиной  $h = 100$  см, состоящую из 10 бесконечных пластин толщиной  $dh = h/10$  каждая. Плоскости, являющиеся гранями пластин, пронумерованы от 0 до 10, а сами пластины (ячейки) – от 1 до 10. За пределами активной зоны находится вакуум. В 5 ячейку помещен материал с карбидом бора, представляющий собой гомогенную смесь  $B_4C$ ,  $H_2O$  и  $UO_2$  с обогащением 2,4%, материальный состав приведен в таблице 1. Материальный состав остальных пластин описан в таблице 2, это тоже гомогенная смесь.



**Рисунок 1.** Геометрия задачи с поглотителем  
**Figure 1.** Problem geometry with the absorber

**Таблица 1.** Материальный состав поглощающей пластины

**Table 1.** Material composition of the absorber plate

Материал	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Объемная доля в смеси
$H_2O$	0,72	0,5
$UO_2$ (2,4%)	10,3	0,45
$B_4C$	2,52	0,05

**Таблица 2.** Материальный состав топливных пластин

**Table 2.** Material composition of fuel plates

Материал	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Объемная доля в смеси
$H_2O$	0,72	0,5
$UO_2$ (2,4%)	10,3	0,5

### Угловое распределение потока нейтронов на гранях

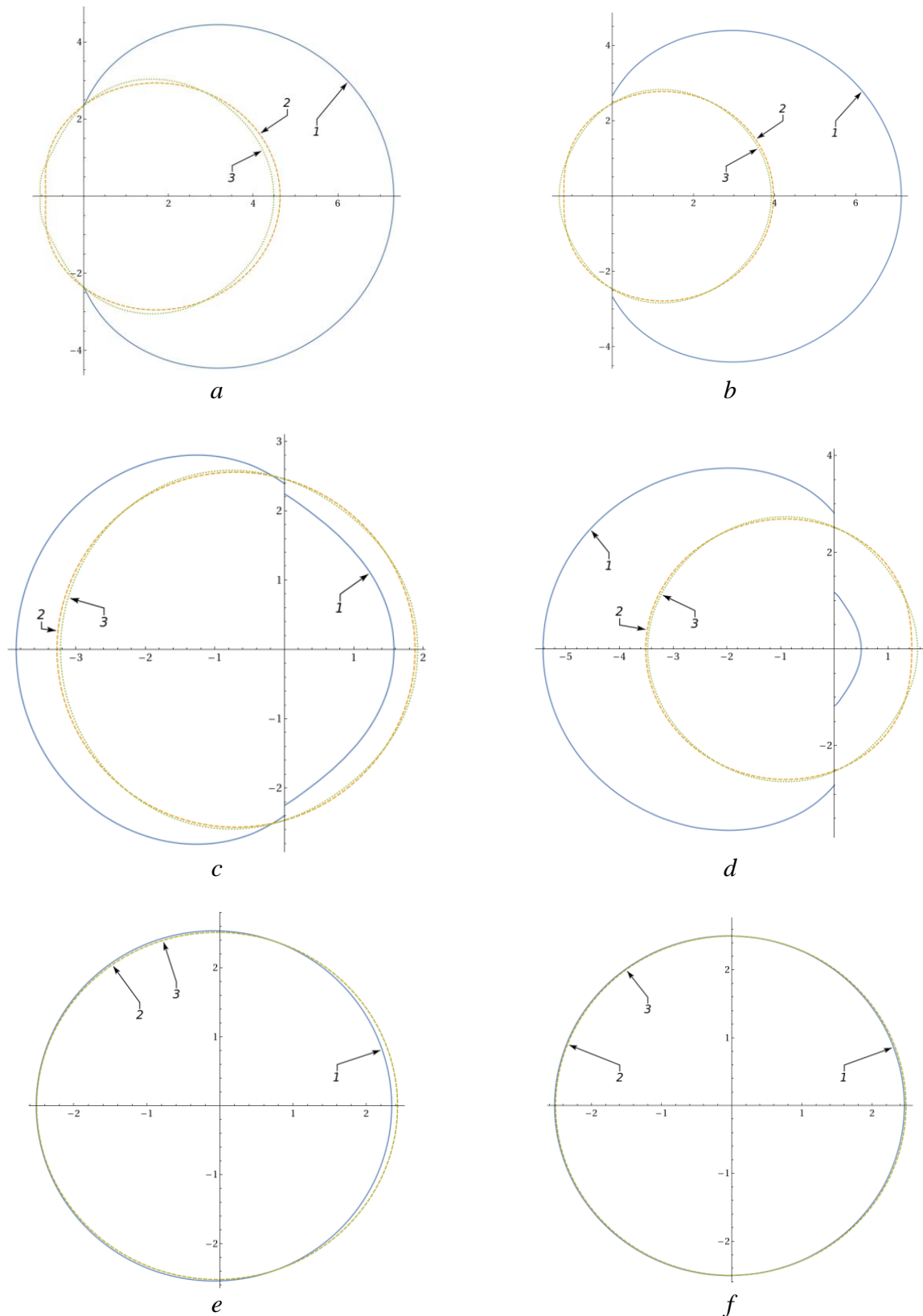
Используя метод Монте-Карло, реализованный в OpenMC, можно получить детальное угловое распределение направлений движения нейтронов. Наша идея заключалась в том, чтобы отдельно описать нейтроны, летящие в одну сторону от грани ячейки и в другую.

Для изучения углового распределения потока нейтронов, пересекающих грани пластин, использовался программный код OpenMC, а именно модуль для регистрации `openmc.MuSurfaceFilter`<sup>1</sup>, позволяющий собирать статистику распределения нейтронов в зависимости от косинуса угла между направлением движения нейтрона и нормалью к поверхности в точке пересечения ее данным нейтроном.

Для решения этой задачи в OpenMC была создана расчетная модель, полностью соответствующая всем геометрическим и материальным характеристикам, перечисленным в предыдущем разделе.

Однако этого оказалось недостаточно, поскольку для получения необходимых угловых зависимостей потребовалось модернизировать OpenMC, т.е. внести изменения в исходный код модуля `openmc.MuSurfaceFilter`. Фрагмент данного кода с выделенными синим цветом изменениями представлен на рисунке 2.

<sup>1</sup> `openmc.MuSurfaceFilter` — OpenMC Documentation. — Available at: <https://docs.openmc.org/en/stable/pythonapi/generated/openmc.MuSurfaceFilter.html> (accessed: 16.01.2026).



**Рисунок 3.** Угловое распределение направлений движения нейтронов в полярной системе координат (1 – МПМ, 2 – сумма сферических функций до 2 порядка, 3 – сумма сферических функций до 5 порядка): *a* – грань 10, быстрая группа; *b* – грань 10, тепловая группа; *c* – грань 5, быстрая группа; *d* – грань 5, тепловая группа; *e* – грань 7, быстрая группа; *f* – грань 7, тепловая группа

**Figure 3.** Neutron angular distributions in polar coordinates (1 – SMM, 2 – sum of spherical harmonics up to order 2, 3 – sum of spherical harmonics up to order 5): *a* – face 10, fast group; *b* – face 10, thermal group; *c* – face 5, fast group; *d* – face 5, thermal group; *e* – face 7, fast group; *f* – face 7, thermal group

Таким образом, было заблокировано изменение направления нормали к пересекаемой нейтроном поверхности, связанное со свойствами самого нейтрона, т.е. теперь нормаль к поверхности остается неизменной. Это изменение позволило получить распределение по косинусам углов между направлением движения нейтрона и нормалью к пересекаемой поверхности по обе стороны от данной поверхности.

Для получения распределения в виде линейной комбинации сферических функций применялся модуль `openmc.SphericalHarmonicsFilter`<sup>2</sup>, позволяющий собирать моменты сферических функций до заданного порядка по направлениям движения нейтронов.

```
void MuSurfaceFilter::get_all_bins(
    const Particle& p, TallyEstimator estimator, FilterMatch& match) const
{
    // Get surface normal (and make sure it is a unit vector)
    const auto surf {model::surfaces[p.surface_index()].get()};
    auto n = surf->normal(p.r());
    n /= n.norm();

    // Determine whether normal should be pointing in or out
    // if (p.surface() < 0) //
    //     n *= -1;

    // Determine cosine of angle between normal and particle direction
    double mu = p.u().dot(n);
    if (std::abs(mu) > 1.0)
        mu = std::copysign(1.0, mu);

    // Find matching bin
    if (mu >= bins_.front() && mu <= bins_.back()) {
```

**Рисунок 2.** Фрагмент исходного кода модуля `openmc.MuSurfaceFilter`

**Figure 2.** Source code snippet of the `openmc.MuSurfaceFilter` module

На рисунке 3 изображены результаты моделирования в двух энергетических группах. Они представляют собой графики со сравнением угловых распределений потоков нейтронов на разных гранях.

Первый способ – отдельное описание для двух направлений (по обе стороны от грани) в виде непрерывных функций. Такой способ описания углового распределения планируется использовать в методе поверхностных моментов (МППМ).

Второй способ – разложение по сфериче-

ским функциям, приведены результаты до 5 порядка. Такое описание используется в диффузионном приближении, МППГ и  $P_n$ -методах.

Из графиков  $e, f$  видно, что оба подхода дают одинаковые физически адекватные результаты. Однако остальные графики показывают, что при наличии неоднородности угловые распределения существенно отличаются. Даже повышение порядка используемых сферических функций не позволяет добиться лучшего совпадения результатов.

### Метод поверхностных моментов

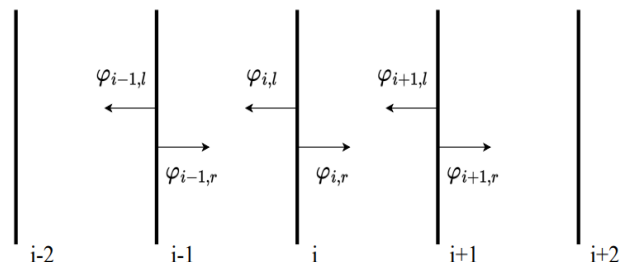
Исследуемый способ описания распределения потока нейтронов в активной зоне заключается в использовании связи втекающих – вытекающих моментов потоков нейтронов.

Уравнения связи втекающих – вытекающих моментов потоков нейтронов имеют вид (1) и проиллюстрированы рисунком 4.

$$\begin{aligned} \vec{\varphi}_{i,l} &= R \cdot \vec{\varphi}_{i,r} + T \cdot \vec{\varphi}_{i+1,l}, \\ \vec{\varphi}_{i,r} &= R \cdot \vec{\varphi}_{i,l} + T \cdot \vec{\varphi}_{i-1,r}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $R$  – матрица отражения нейтронов;

$T$  – матрица прохождения нейтронов через ячейку.



**Рисунок 4.** Моменты потоков нейтронов  
**Figure 4.** Neutron flux moments

С учетом угловых распределений и энергетических групп момент потока нейтронов можно описать выражением (2):

$$\varphi_{i,d,h,g} = \int_{\Omega} F_h(\Omega) \Phi_{i,d}^g(\Omega) d\Omega, \quad (2)$$

где  $i$  – номер грани;

$d$  – направление движения нейтронов;

$h$  – номер угловой гармоники;

$g$  – номер энергетической группы.

<sup>2</sup> `openmc.SphericalHarmonicsFilter` — OpenMC Documentation. – Available at: <https://docs.openmc.org/en/stable/pythonapi/generated/openmc.SphericalHarmonicsFilter.html> (accessed: 16.01.2026).

Задача на собственные значения определяется следующим образом, формула (3):

$$\hat{L}\varphi = \lambda \hat{dL}\varphi. \quad (3)$$

Левую часть выражения (3) можно переписать в виде выражений (4):

$$\begin{aligned} \vec{\varphi}_{i,l} - R \cdot \vec{\varphi}_{i,r} - T \cdot \vec{\varphi}_{i+1,l}, \\ \vec{\varphi}_{i,r} - R \cdot \vec{\varphi}_{i,l} - T \cdot \vec{\varphi}_{i-1,r}. \end{aligned} \quad (4)$$

А правую – в виде выражений (5):

$$\begin{aligned} \lambda (-dR \cdot \vec{\varphi}_{i,r} - dT \cdot \vec{\varphi}_{i+1,l}), \\ \lambda (-dR \cdot \vec{\varphi}_{i,l} - dT \cdot \vec{\varphi}_{i-1,r}), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $dR$  – матрица отклонений элементов матрицы отражения нейтронов при изменении размножающих свойств ячейки,

$dT$  – матрица отклонений элементов матрицы прохождения нейтронов через ячейку при изменении размножающих свойств ячейки.

Пары из выражений (4) и (5) должны быть записаны для всех граней.

В качестве искомого нейтронно-физического функционала в задачах на собственные значения в данной работе рассматривается интегральная скорость реакции деления в ячейке. Через моменты потоков нейтронов для  $i$ -й ячейки она вычисляется по формуле (6):

$$R_f^i = \sum_{h=1}^H \sum_{g=1}^2 f_{h,g} (\varphi_{i-1,r,h,g} + \varphi_{i,l,h,g}), \quad (6)$$

где  $f_{h,g}$  – элемент вектора коэффициентов чувствительности данного функционала к моментам потоков нейтронов;

$H$  – количество угловых гармоник.

Для сравнения результатов, полученных разными методами, интегральные скорости реакции деления в ячейках нормируются на средние значения по формуле (7):

$$R_{f,n}^i = \frac{R_f^i}{R_f}. \quad (7)$$

Матрицы  $R$ ,  $T$ ,  $dR$ ,  $dT$  и вектор  $\vec{f}$  являются данными, необходимыми для решения задачи. Их подготовка реализуется решением задачи с источником методом Монте-Карло в одной ячейке рассматриваемого реактора, в данном случае – пластины. Источ-

ник задается на одной из граней ячейки, граничные условия – «черное» тело. На всех гранях ячейки регистрируются моменты потоков нейтронов, вылетающих из ячейки, которые можно описать формулой (2). Такой расчет проводится для различных вариантов задаваемого источника, варьируются энергетические группы и угловые распределения.

Затем полученные данные собираются в матрицы моментов потоков нейтронов, вылетающих через разные грани. После этого с помощью метода линейной регрессии, реализованного в пакете `scikit-learn` языка Python, готовятся матрицы преобразования источника нейтронов в выходные моменты потоков нейтронов, то есть матрица отражения нейтронов  $R$ , и матрица прохождения нейтронов через ячейку  $T$ . Аналогичным образом происходит подготовка матриц преобразования с возмущением размножающих свойств ячейки, затем вычисляются отклонения элементов и составляются матрицы  $dR$  и  $dT$ .

Также во время расчета задачи с источником набирается статистика по необходимому нейтронно-физическому функционалу, а затем из нее составляется вектор коэффициентов чувствительности данного функционала к моментам потоков нейтронов  $\vec{f}$ .

Для рассматриваемой задачи расчеты матриц  $R$ ,  $T$ ,  $dR$ ,  $dT$  и вектора  $\vec{f}$  методом Монте-Карло занимают порядка 5 секунд. Решение системы уравнений – около 10 миллисекунд.

Для практических инженерных расчетов планируется заранее подготавливать матрицы как функции от свойств ячеек. Они будут использоваться в крупносеточном программном коде в связке с теплофизическим модулем. В начале на основе теплофизического расчета определяются матрицы, после этого в результате решения матричной задачи вычисляются поля энерговыделения и другие необходимые функционалы.

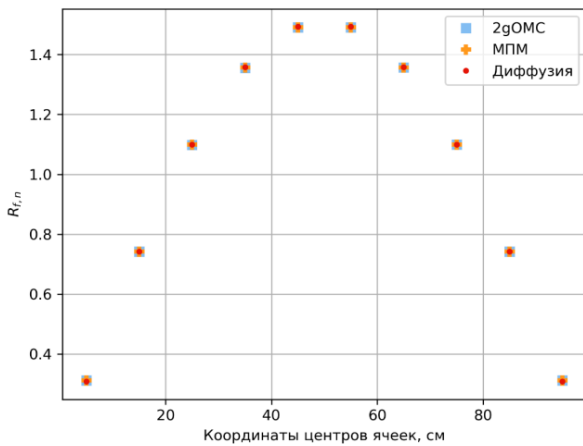
### Оценка точности расчета скорости деления

В качестве референсных решений используются результаты расчетов активных зон в программе OpenMC. Кроме этого, результаты решений методом поверхностных мо-

ментов сравниваются с численными решениями двухгрупповых уравнений диффузии. Диффузионная задача решалась методом конечных элементов на мелкой сетке.

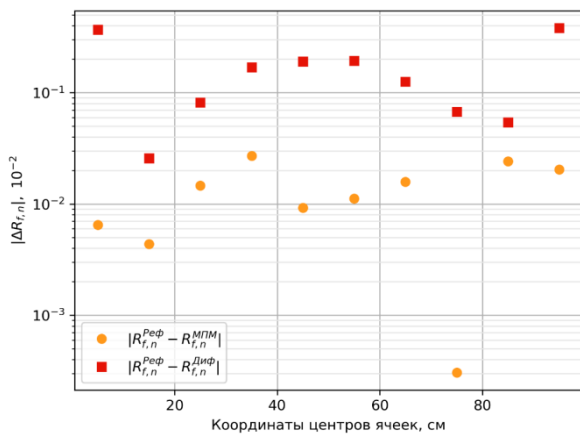
Рассматриваются две задачи, их геометрия изображена на рисунке 1. В первой задаче все ячейки заполнены материалом из таблицы 2, а вторая задача была описана выше.

График скоростей реакции деления, рассчитанных тремя разными методами, представлен на рисунке 5, а на рисунке 6 изображены отклонения двух решений от референсного.



**Рисунок 5.** Относительные скорости реакции деления в ячейках (задача 1)

**Figure 5.** Relative fission rates in cells (problem 1)

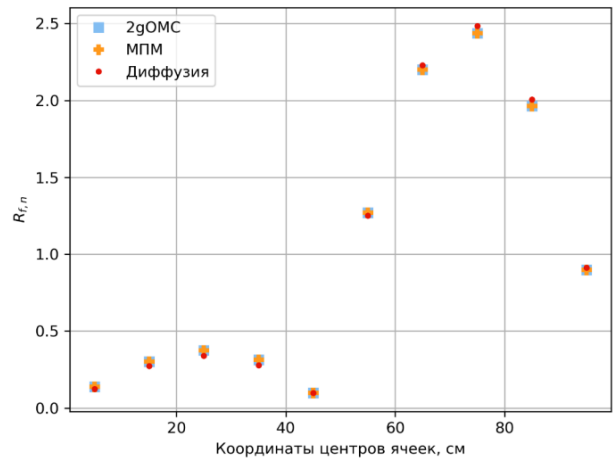


**Рисунок 6.** Отклонения значений  $R_{f,n}$  от референсного решения (задача 1)

**Figure 6.** Deviations of  $R_{f,n}$  values from the reference solution (problem 1)

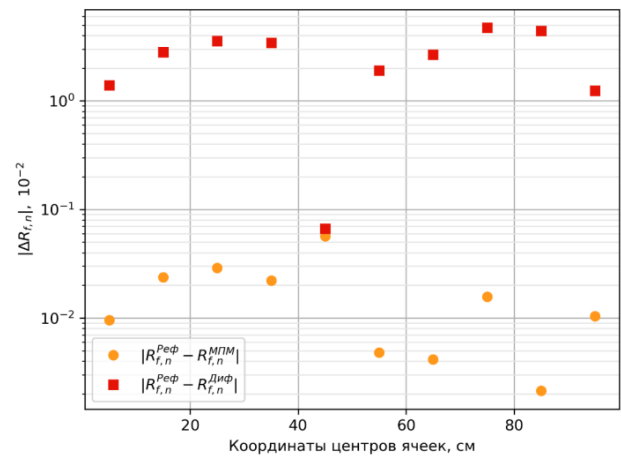
Можно заметить, что отклонения метода поверхностных моментов на порядок ниже, чем диффузионного приближения.

После этого решалась задача с сильным поглотителем. Результаты приведены на рисунках 7 и 8.



**Рисунок 7.** Относительные скорости реакции деления в ячейках (задача 2)

**Figure 7.** Relative fission rates in cells (problem 2)



**Рисунок 8.** Отклонения значений  $R_{f,n}$  от референсного решения (задача 2)

**Figure 8.** Deviations of  $R_{f,n}$  values from the reference solution (problem 2)

Результаты показали, что даже внесение сильной неоднородности в активную зону не повлияло на величины отклонений метода поверхностных моментов.

## Заключение

Предлагаемый подход позволяет значительно повысить точность воспроизведения скоростей реакции деления в ячейках по сравнению с диффузионным приближением и  $P_n$ -приближением. Рассмотренные в работе задачи с сильными поглотителями дают основание полагать, что метод поверхностных моментов может быть полезен для расчетов ВВЭР-С и реакторных установок АСММ.

Полученные результаты демонстрируют возможность достижения точности расчета относительных скоростей реакции деления

в пределах долей процента, поскольку максимальная погрешность в представленных в работе задачах составила 0,6 %.

Основным требованием, необходимым для применения метода поверхностных моментов, является возможность представления расчетной модели в виде ячеечной структуры с плоскими гранями, например, пластин или различных призм. Именно

такой геометрией характеризуется большая часть современных реакторных установок.

Дальнейшие исследования будут направлены на проведение трехмерных расчетов тестовых задач и бенчмарков, создание полноценного нейтронно-физического модуля и его последующую интеграцию в программные коды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ojinnaka C.A.S., Zimin V.G., Strashnykh V.P., Nikonov S.P. Analysis of the Kalinin-3 coolant transient benchmark by SKETCH-N/SKAZKA code system. *Annals of Nuclear Energy*. 2020;147:107716. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107716>

2. Лизоркин М.П. Двухгрупповое редкосеточное нодальное уравнение баланса нейтронов программы БИПР-8. *Атомная энергия*. 2008;105(1):8-17. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2406> (дата обращения: 14.01.2026).

Lizorkin M.P. Two-group sparse-grid nodal neutron balance equation of the BIPR-8 computer program. *Atomic Energy*. 2008;105(1):8-17. <https://doi.org/10.1007/s10512-008-9059-0>

3. Плеханов Р.В., Лысов Д.А. Коэффициенты диффузии для конечно-разностных схем расчетов РБМК. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов*. 2016;(3):48-52. Режим доступа: <https://nrcki.ru/files/pdf/1478857983.pdf> (дата обращения: 14.01.2026).

Plekhanov R.V., Lysov D.A. Diffusion coefficients for finite-difference RBMK calculation schemes. *Issues of atomic science and technology. Ser. Nuclear reactor physics*. 2016;(3):48-52. (In Russ.). Available at: <https://nrcki.ru/files/pdf/1478857983.pdf> (accessed: 14.01.2026).

4. Ельшин А.В. Получение конечно-разностных уравнений для ценности нейтронов в гетерогенном реакторе методом поверхностных гармоник. *Атомная энергия*. 2005;98(5):323-332. <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3253>

El'shin A.V. Surface-Harmonics Derivation of the Finite-Difference Equations for the Neutron Value in a Heterogeneous Reactor. *Atomic Energy*. 2005;98(5):307-314. <https://doi.org/10.1007/s10512-005-0210-x>

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Семенов А.А.** – концептуализация методологии исследования, формулировка теоретических положений, общее руководство написанием и редактированием статьи;

**Субботин А.М.** – разработка методологии исследования, формирование плана исследовательских мероприятий, производство расчетов в рамках исследования, написание статьи.

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Semenov A.A.** – conceptualisation of the research methodology, formulation of theoretical principles, overall supervision of the writing process and editing of the article;

**Subbotin A.M.** – developing a research methodology, drawing up a research plan, carrying out calculations as part of the research, and writing the article.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

#### FUNDING:

The authors declare no external funding.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare no conflict of interest.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Семенов Андрей Артемьевич**, главный эксперт АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0002-5495-3662>  
e-mail: dozaand@mail.ru

**Субботин Александр Максимович**, инженер АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Российская Федерация. e-mail: yadfizik@yandex.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Andrey A. Semenov**, Chief Expert, JSC «VNIIAES», Moscow, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-5495-3662>  
e-mail: dozaand@mail.ru

**Aleksandr M. Subbotin**, Engineer, JSC «VNIIAES», Moscow, Russian Federation. e-mail: yadfizik@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 19.01.2026

После доработки / Revision 25.04.2026

Принята к публикации / Accepted 28.04.2026

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ  
OPERATION OF FACILITIES  
NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-06>

УДК 621.039.5:536.7

EDN NYUWBH

Оригинальная статья / Original paper



**Моделирование термодинамических процессов в системе основной охлаждающей воды энергоблока ВВЭР-1200**

**Г.А. Башкиров<sup>1</sup> ✉, А.Д. Данилов<sup>1</sup>, Н.В. Карандеева<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Воронежский Государственный Технический Университет, г. Воронеж,  
Воронежская область, Российская Федерация

<sup>2</sup>Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»  
г. Нововоронеж, Воронежская область, Российская Федерация

✉ [bashkirovga@oiate.ru](mailto:bashkirovga@oiate.ru)

**Аннотация.** В статье произведена оценка влияния температуры охлаждающей воды на давление в главных конденсаторах паротурбинной установки К-1200-6.8/50 для АЭС с реактором ВВЭР-1200 на примере энергоблока №1 НВАЭС-2. По результатам исследования создана имитационная теплогидравлическая модель в среде динамического моделирования технических систем SimInTech, учитывающая влияние процесса тепломасообмена в башенной испарительной градирне и тепловой баланс конденсатора турбины. Модель позволяет произвести количественную оценку влияния температуры воздуха на величину вакуума в конденсаторе турбоустановки. По полученным данным построены графики зависимости давления в конденсаторе от температуры основной охлаждающей воды, с помощью которых можно спрогнозировать момент наступления эксплуатационных пределов. Данная оценка особенно актуальна для атомных электростанций, построенных в южной части центральной России, а также для зарубежных проектов ГК Росатом. Опыт эксплуатации систем охлаждения, особенно с жесткой водой, показывает, что соблюдение требований чистоты внутрикорпусных устройств является важной мерой в поддержании водно-химического режима и оптимизации режимов работы градирни, поэтому в описании модели введен параметр загрязнения. В задачи данного исследования входила оценка влияния только внешних условий окружающей среды, а именно температуры окружающего воздуха, без учета процесса образования отложений в системе. Практическая значимость работы заключается в анализе эксплуатационных данных для обоснования необходимости корректирующих мер и модернизационных решений, которые могут быть использованы работниками АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» для повышения эффективности работы системы оборотного технического водоснабжения с башенными испарительными градирнями.

**Ключевые слова:** Башенная испарительная градирня, конденсатор, тепломассообмен, уравнение Меркеля, SimInTech, математическая модель, АЭС

**Для цитирования:** Башкиров Г.А., Данилов А.Д., Карандеева Н.В. Моделирование термодинамических процессов в системе основной охлаждающей воды энергоблока ВВЭР-1200. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(2):57-66. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-06>

**For citation:** Bashkirov G.A., Danilov A.D., Karandeeva N.V. Modeling of thermodynamic processes in the main cooling water system of the VVER-1200 power unit. *Nuclear Safety*. 2026;16(2):57-66. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-06>

**Modeling of thermodynamic processes in the main cooling water system of the VVER-1200 power unit**

**Georgy A. Bashkirov<sup>1</sup> ✉, Alexander D. Danilov<sup>1</sup>, Natalya V. Karandeeva<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Voronezh region, Russian Federation

<sup>2</sup>Novovoronezh Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC,  
Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation

✉ [bashkirovga@oiate.ru](mailto:bashkirovga@oiate.ru)

**Abstract.** The article evaluates the effect of the cooling water temperature on the pressure in the main condensers of a steam turbine installation C-1200-6.8/50 for nuclear power plants with a VVER-1200 reactor. Based on the results of the study, a simulated thermohydraulic model is created in the dynamic modeling environment of SimInTech technical systems, taking into account the influence of the heat and mass transfer process in the tower evaporative cooling tower and the thermal balance of the turbine condenser. The model makes it possible to quantify the effect of air temperature on the vacuum in the turbine condenser. Based on the data obtained, graphs of the dependence of the pressure in the condenser on the temperature of the main cooling water are constructed, with the help of which it is possible to predict the moment of the onset of operational limits. This assessment is especially relevant for nuclear power plants built in the southern part of central Russia, as well as for foreign projects of Rosatom State Corporation. The experience of operating cooling systems, especially with hard water, shows that compliance with the cleanliness requirements of internal devices is an important measure in maintaining the water-chemical regime and optimizing the operating modes of the cooling tower, therefore, the pollution parameter is introduced in the model description. The objectives of this study are to assess the influence of only external environmental conditions, namely ambient air temperature, without taking into account the process of sediment formation in the system. The practical significance of the work lies in the analysis of operational data to substantiate the need for corrective measures and modernization solutions that can be used by employees of JSC Concern Rosenergoatom Novovoronezh Nuclear Power Plant to improve the efficiency of the circulating water supply system with tower evaporative cooling towers.

**Keywords:** tower evaporative cooling tower, condenser, heat and mass transfer, Merkel equation, SimInTech, mathematical model, NPP

## Введение

Строительство новых мощных блоков с ВВЭР-1200 предъявляет высокие требования к оборудованию АЭС в плане заявленной выработки электроэнергии. Если рассматривать второй контур энергоблока АЭС, как термодинамическую систему, то выбор начальных параметров будет ограничен физическими основами реакторной установки ВВЭР, которые не позволяют повышать давление и температуру свежего пара выше установленных требований. Оптимальные параметры в конце цикла паротурбинной установки будут зависеть от вакуума в конденсаторе турбины, который зависит от температуры основной охлаждающей воды. В контур оборотного технического водоснабжения Нововоронежской АЭС-2 с реактором ВВЭР-1200 входит башенная испарительная градирня, которая предназначена для охлаждения нагретой охлаждающей воды в конденсаторе, обеспечивая оптимальную температуру и безопасную эксплуатацию оборудования. Чем эффективнее осуществляется процесс теплообмена в градирне, тем более оптимально давление в конденсаторе, которое положительно влияет на увеличение располагаемого теплоперепада в паротурбинной установке, что повышает КПД энергоблока АЭС и выработку электроэнергии в энергосистему в целом [1].

Целью исследования явилось определение

критических параметров эксплуатации, при которых происходит разгрузка энергоблока без учета влияния химии воды. Опыт эксплуатации больших систем охлаждения, особенно с жесткой водой, показывает, что соблюдение требований чистоты внутрикорпусных устройств (ВКУ) является важной мерой в поддержании водно-химического режима и оптимизации режимов работы градирни, поэтому в описании модели введен параметр загрязнения [2]. В задачи данного исследования входила оценка влияния только внешних условий окружающей среды, а именно температуры окружающего воздуха, без учета процесса образования отложений в системе [3]. Для достижения поставленной цели использован метод математического моделирования на базе программного комплекса SimInTech.

В статье приведена математическая модель системы основной охлаждающей воды с условно чистой градирней для расчета изменения давления в конденсаторе турбины К-1200-6,8/50 в наиболее жаркий период года в зависимости от температуры атмосферного воздуха.

## Материалы и методы

В состав оборотной системы охлаждения Нововоронежской АЭС-2 входят циркуляционные насосы охлаждения конденсатора и насосы технической воды для охлаждения

неответственных потребителей машинного зала. К системе оборотного водоснабжения относится непосредственно сама башенная испарительная градирня с водоотводящим каналом и здание блочной насосной станции, которая включает в себя основное и вспомогательное оборудование циркуляционных насосов [4].

При температуре охлаждающей воды от 12 до 31°C обеспечивается достаточная глубина вакуума для проектного режима работы конденсатора. Ежегодно с мая по сентябрь температура охлаждающей воды Нововоронежской АЭС превышает проектное значение +31°C, что влечет за собой ограничение мощности.

Зависимость величины разгрузки (изменение мощности) турбогенератора [5] от температуры охлаждающей воды представлено на рисунке 1.

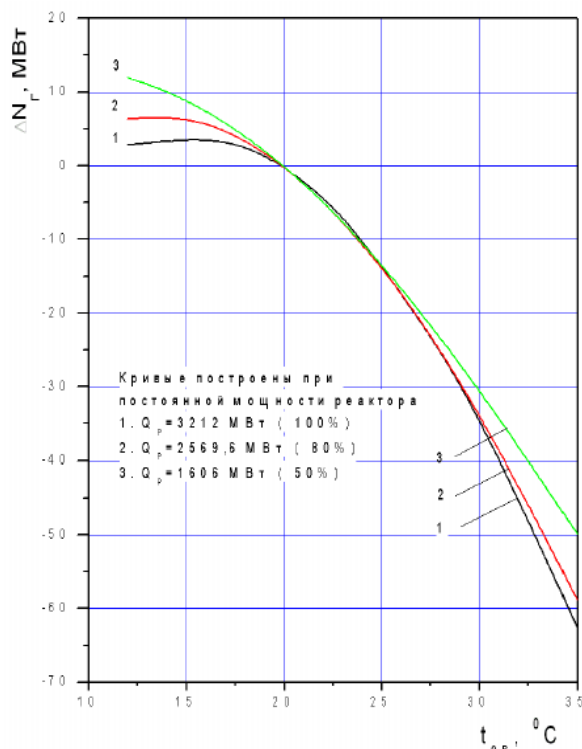


Рисунок 1. Изменение мощности в зависимости от температуры охлаждающей воды

Figure 1. Power change depending on the cooling water temperature

SimInTech – программная платформа для разработки математических моделей, алгоритмов управления, мнемосхем и видеокладов, обладающая возможностью автоматической генерации кода для программируемых контроллеров. Программное обеспечение

SimInTech является модульным программным обеспечением, в составе которого входит несколько математических ядер, база данных, графическая среда разработки, кодогенераторы и другие модули. В данной статье проводится работа со средой разработки «модель общего вида», которая включает в себя набор блоков-операторов, таких как константа функции, программатор, база сигналов, а также блок-оператор внутреннего программного кода, который позволяет выполнять создание собственных блоков-операторов для выполнения необходимых задач.

В качестве входных параметров в математической модели зададим постоянным расход охлаждающей воды на вход в конденсатор турбины, теплоту, отводимую от конденсатора, уровень загрязнения внутрикорпусных устройств башенной градирни. Состояние температуры окружающего воздуха зададим в виде блока-оператора «синусоида», который будет имитировать изменение окружающей среды.

Для описания процесса теплообмена в блоке-задатчике внутреннего языка программирования SimInTech воспользуемся уравнением Меркеля (1), описывающим изменение температуры по высоте оросителя в башенной испарительной градирне:

$$\frac{dT}{dz} = \frac{-\beta_{xa} \cdot (h'' - h)}{c_{\omega} \cdot q_{\omega}} \quad (1)$$

где  $T$  – температура воды, °C;

$z$  – высота оросителя, м;

$\beta_x \alpha$  – объемный коэффициент массопередачи, кг/(м<sup>3</sup>·с);

$h''$  – энтальпия насыщенного влажного воздуха при определенной температуре воды, Дж/кг;

$h$  – энтальпия влажного воздуха в ядре потока, Дж/кг;

$c_{\omega}$  – удельная теплоемкость воды, Дж/кг;

$q_{\omega}$  – плотность орошения, кг/(м<sup>2</sup>·с).

При внедрении в математическую модель уравнения Меркеля важно учитывать зависимость плотности орошения от расхода охлаждающей воды и площадь орошения, которая будет зависеть от типа оросителя, его формы, а также объема пакетов-оросителей в одном слое башенной испари-

тельной градирне. Данная зависимость указана в формуле (2):

$$q_{\omega} = \frac{G_{\omega}}{F_{op}}, \quad (2)$$

где  $G_{\omega}$  – массовый расход охлаждающей воды, кг/с;

$F_{op}$  – площадь орошения, м<sup>2</sup>.

Для повышения точности вычислений термодинамических процессов в башенной градирне используем для численного решения уравнения (3) дискретизацию по высоте оросителя  $H$  с числом слоев  $N$ :

$$T_{i+1} = T_i - \frac{\beta_{xa} \cdot (h'' - h)}{c_{\omega} \cdot q_{\omega}} \cdot \Delta z, i = 1 \dots N, \quad (3)$$

где  $T_i = T_{in}$  – температура воды на входе в градирню (после конденсатора) °С;

$T_{out} = T_{N+1}$  – температура охлажденной воды на выходе из градирни.

Важно учитывать в формуле (3) зависимость по числу и высоте слоев (4), представленную в виде:

$$\Delta z = \frac{H}{N}. \quad (4)$$

Для учета карбонатных отложений введем коэффициент загрязнения  $K_{foul}$ , снижающий эффективный коэффициент массопередачи и принимающий значения: от 0 – чистая градирня, до 1 – предельно загрязненная. Зависимость коэффициента массопередачи от степени загрязнения градирни описывается уравнением (5):

$$\beta_{xa} = (\beta_{xa})_0 \cdot (1 - K_{foul}), \quad (5)$$

где  $(\beta_x \alpha)_0$  – коэффициенты, вычисляемые для чистой водораспределительной системы градирни.

Для составления уравнения теплового баланса в конденсаторе воспользуемся формулой расчета степени нагрева циркуляционной воды  $\Delta T_{cond}$  (6):

$$\Delta T_{cond} = \frac{Q_k \cdot 10^6}{G_{\omega} \cdot c_{\omega}}, \quad (6)$$

где  $Q_k$  – тепловая нагрузка конденсатора, МВт;  
 $G_{\omega}$  – расход циркуляционной воды, т/ч;  
 $c_{\omega}$  – удельная теплоемкость воды, Дж/кг;

$T_{in}$  – температура воды на выходе из конденсатора, °С;

$T_{out}$  – температура охлажденной воды на выходе из градирни, °С;

$\Delta T_{cond}$  – изменение температуры циркуляционной воды, °С.

Зависимость температуры воды на выходе из конденсатора<sup>1</sup> и температуры охлажденной воды на выходе из градирни можно представить с помощью изменения температуры циркуляционной воды (7):

$$T_{in} = T_{out} + \Delta T_{cond}. \quad (7)$$

Значения температуры воздуха рассчитаем в виде гармонического сигнала с постоянной составляющей (8):

$$T_{air(t)} = T_{avg} + A \sin \frac{2\pi t}{P}, \quad (8)$$

где  $A$  – эмпирический коэффициент;

$T_{avg}$  – среднесуточная температура, °С;

$P$  – период гармонических колебаний.

Среднюю температуру воды в конденсаторе  $T_{sat}$  (температура насыщения) рассчитаем по формуле (9):

$$T_{sat} = T_{out} + \frac{\Delta T_{cond}}{2}. \quad (9)$$

Давление в конденсаторе  $P_k$  опишем линейной аппроксимацией давлений в рабочем диапазоне (10):

$$P_k = P_0 + k_p(T_{sat} - 25), \quad (10)$$

где  $P_0$  – давление при температуре насыщения 25 °С = 4,0 кПа;

$k_p$  – прирост давления на 1 °С = 0,57 кПа/°С.

При составлении и расчете математической модели энтальпию воздуха на входе в башенную испарительную градирню вычислим при помощи зависимости (11):

<sup>1</sup> Хабаров С.П., Шилкина М.Л. Основы моделирования технических систем. Среда SimInTech : учебное пособие. – Санкт-Петербург : Издательство «Лань», 2019. – 120 с. – Режим доступа: [https://rusneb.ru/catalog/000199-000009\\_012904205/?ysclid=mowrqv8zt7967763358](https://rusneb.ru/catalog/000199-000009_012904205/?ysclid=mowrqv8zt7967763358) (дата обращения: 14.01.2026).

$$h_{air} = (k_{h1} \cdot T_{air} + k_{h0}) \cdot 1000, \quad (11)$$

где  $h_{air}$  – энтальпия воздуха на входе, Дж/кг;  
 $k_{h1}$  – коэффициент энтальпии = 1,88 кДж/(кг·°C);

$k_{h0}$  – постоянная энтальпии = 2500 кДж/кг;

$T_{air}$  – температура наружного воздуха, °C.

Используемая в модели упрощенная линейная зависимость энтальпии насыщенного воздуха от температуры была откалибрована по табличным данным для диапазона температур  $T = 20 \div 60$  °C. Диапазон калибровки был выбран:  $k_{h1}$  от 1,5 до 2,5 кДж/(кг·°C),  $k_{h0}$  от 2000 до 3000 кДж/кг. Основным критериям являлась минимизация среднеквадратичной ошибки между табличными значениями энтальпии и линейной аппроксимацией. Полученные значения:  $k_{h1} = 1,88$  кДж/(кг·°C),  $k_{h0} = 2500$  кДж/кг. Ошибка аппроксимации в рабочем диапазоне (30 ÷ 50 °C) не превышает 2,5 %.

Для разработки математической модели с последующей верификацией зададим конструктивные (геометрические) параметры, режимные параметры, калибруемые параметры, идентифицируемые по экспериментальным данным.

На основе проектной документации башенной градирни зададим следующие конструктивные параметры:

- высота оросителя  $H = 1,35$  м;
- число слоев оросителя  $N = 10$ ;
- площадь орошения = 12335,495 м<sup>2</sup>;
- теплоемкость воды  $c_w = 4186$  Дж/(кг·°C).

Зададим режимные параметры, которые влияют от условия работы энергоблока АЭС и могут меняться в расчетах в зависимости от времени года. В качестве начальных условий выберем нагрузку энергоблока 100% от  $N_{ном}$ , температуру наружного воздуха в летний режим работы по средним данным за последние 5 лет:

– расход охлаждающей воды  $G_w = 148000$  т/ч;

– тепловая нагрузка конденсатора  $Q_k = 2000$  МВт;

– температура наружного воздуха (в самый жаркий период года)  $T_{air} = 33,5$ °C;

– относительная влажность воздуха  $\varphi = 60\%$ .

Определим для математической модели

калибруемые параметры путем минимизации расхождения между расчетными и измеренными значениями выходных переменных модели, используя метод Эйлера.

При расчете коэффициент массопередачи для чистой градирни  $(\beta_x, \alpha)_0$ , характеризующий эффективность тепломассообмена в чистом оросителе, выберем диапазон калибровки от 0,5 до 10 кг/(м<sup>3</sup> с).

Коэффициент калибруется таким образом, чтобы при заданных режимных параметрах ( $T_{air} = 25$  °C,  $\varphi = 60$  %,  $G_w = 148000$  т/ч,  $Q_k = 2000$  МВт) расчетная температура  $T_{out}$  совпадала с измеренным значением 31 °C (весенний режим работы АЭС). В результате получили  $(\beta_x, \alpha)_0 = 8$  кг/(м<sup>3</sup> с).

Расчет выполнялся послойно, для определения калибруемых параметров использовалась расчетная тепловая схема турбоустановки К-1200-6,8/50 в режиме максимальных электрических нагрузок, рисунок 2.

Непосредственное соединение выхода блока «Конденсатор» со входом блока «Градирня», а его выхода – со входом «Конденсатор» привело к возникновению классической проблемы алгебраической петли (Algebraic Loop). SimInTech диагностировал эту ошибку, так как для расчета по уравнению (1) в момент времени  $t$  требуется значение, которое, в свою очередь, зависит от  $(t)$ . Это создает циклическую мгновенную зависимость, неразрешимую решателем без дополнительной информации [6]. Для устранения этой проблемы в разрыв сигнальной линии был использован динамический блок «Задержка» (Unit Delay). Данный блок разрывает мгновенную связь, выдавая на выходе в момент времени  $t$  значение своего входа, задержанное на один шаг интегрирования  $(t-dt)$ , что является физически корректным (учет времени переноса воды) и математически разрешимым для решателя<sup>2</sup>. Начальное условие для блока задержки было задано равным расчетной температуре воды в начальный момент моделирования.

<sup>2</sup> Официальная документация SimInTech. Комплекс динамического моделирования SimInTech. Руководство пользователя. 2024. Режим доступа: <https://simintech.ru/support/> (дата обращения: 26.01.2026).

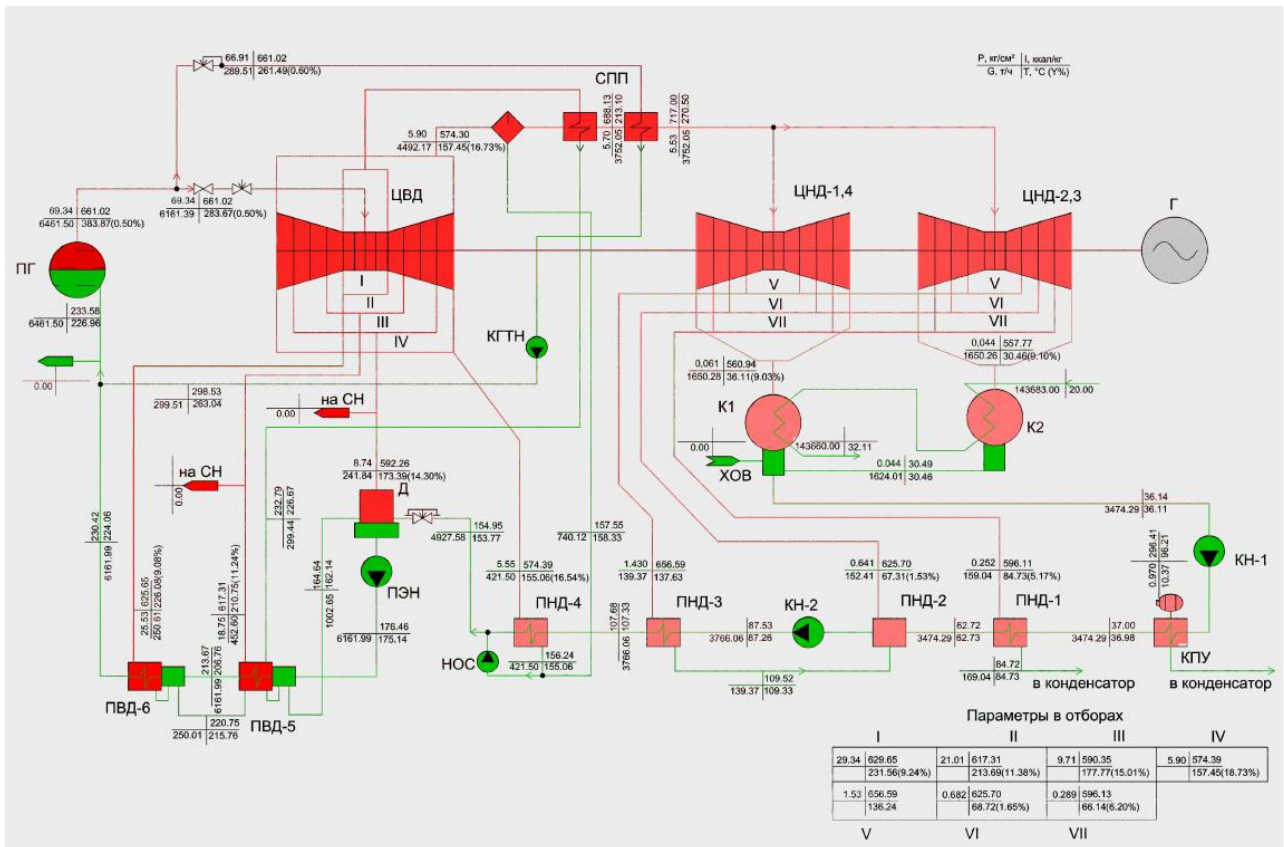


Рисунок 2. Тепловая схема К-1200-6,8/50 в режиме максимальной электрической нагрузки  
 Figure 2. Thermal circuit K-1200-6,8/50 in the maximum electrical load mode

Итоговый вид математической модели изображен на рисунке 3, в нем последовательно соединены основные структурные блоки: константы, блоки расчетного кода

с использованием внутреннего языка программирования SimInTech, вывод расчетов на графики функций.

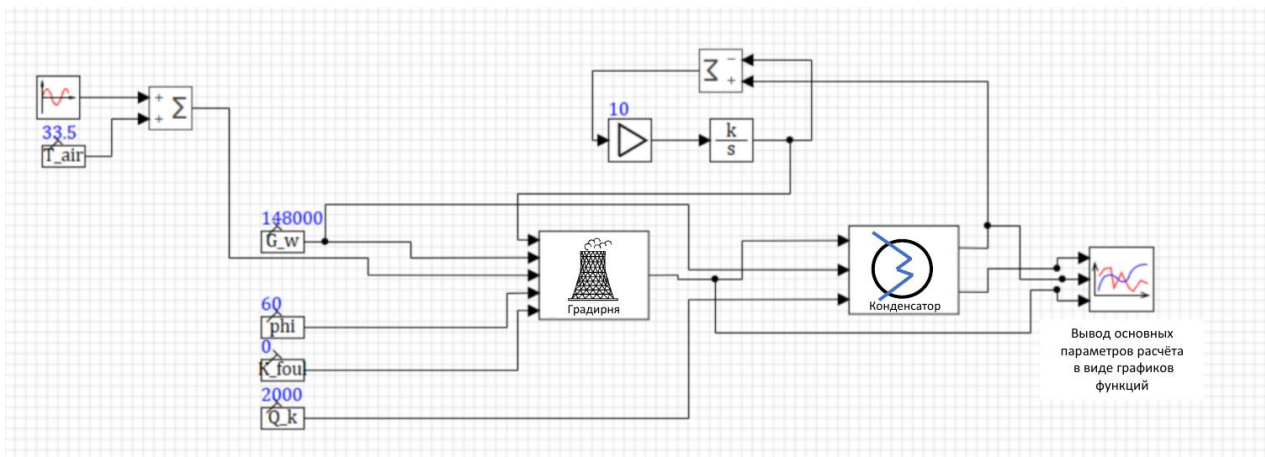
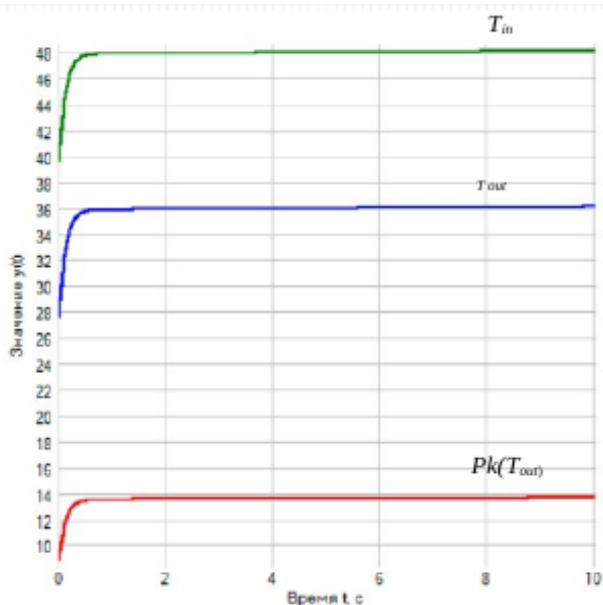


Рисунок 3. Математическая модель расчета влияния давления в конденсаторе от температуры окружающей среды установившегося режима

Figure 3. Mathematical model of calculating the effect of pressure in a condenser on the ambient temperature of a steady state

## Результаты и обсуждение

В результате проведения серии математических вычислений при помощи имитационного математического моделирования в качестве результатов расчета были получены следующие графики функций, изображенные на рисунке 4.



**Рисунок 4.** Зависимость влияния давления в конденсаторе от температуры охлаждающей воды

**Figure 4.** Dependence of the pressure in the condenser on the cooling water temperature

С ростом температуры наружного воздуха в самый жаркий период года увеличивается температура охлажденной воды на выходе из градирни до  $36^{\circ}\text{C}$ , что вызывает изменение давления в конденсаторе – с 9,5 до 13,5 кПа и превышает допустимый предел эксплуатации турбины (12 кПа). При достижении  $P_k = 12$  кПа для поддержания вакуума в допустимых пределах требуется снижать электрическую нагрузку турбоагрегата, что приводит к недовыработке электроэнергии.

Для количественной оценки степени соответствия разработанной математической модели реальным данным эксплуатации энергоблока с реактором ВВЭР-1200 проведено сравнение расчетных значений с измеренными параметрами в диапазоне режимов, характерных для весенне-летнего периода, используя проектные номограммы, а также балансовые испытания работы башенной градирни от 24.07.2023 года, представленные в таблице 1.

Также для верификации математической модели воспользуемся проектной номограммой башенной испарительной градирни, изображенной на рисунке 5.

**Таблица 1.** Эксплуатационные испытания башенной градирни энергоблока №6 Нововоронежской АЭС

**Table 1.** Operational tests of the cooling tower of power unit № 6 of Novovoronezh NPP

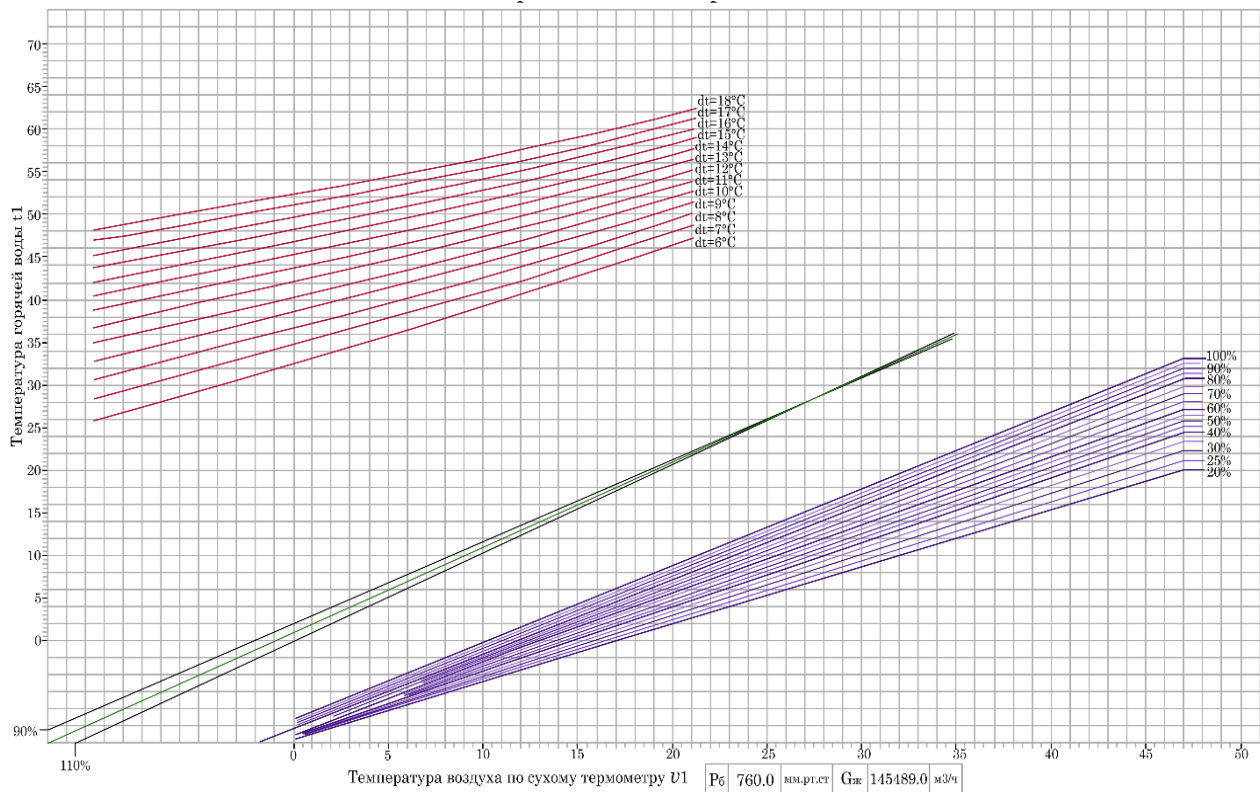
Параметры	Дата	24.07.2023			
	Время	06-00	08-00	10-00	12-00
$T_{\text{наружного воздуха}} (^{\circ}\text{C})$		15,8	19,0	21,8	24,6
Влажность воздуха (%)		87	70	55	43
$T_{\text{вх. в конденсатор}} (^{\circ}\text{C})$		34,1	34,2	34,8	35,0
$T_{\text{вых. с конденсатора}} (^{\circ}\text{C})$		45,5	45,5	46,2	46,4
$N_{\text{эл.}} \text{ МВт}$		1139,4	1134,7	1132,2	1127,4
$N_{\text{р/у.}} \text{ МВт}$		3197,3	3188,7	3199,4	3187,9
$T_{\text{х.вода по расчетной номограмме}} (^{\circ}\text{C})$		33,0	33,0	34,0	34,6
$\Delta T_{\text{вх./вых конденсатор}} (^{\circ}\text{C})$		11,4	11,3	11,4	11,3
$\Delta T_{\text{х. вода}} (^{\circ}\text{C})$		1,1	1,2	0,8	0,4

Номограмма, объединяет рабочие характеристики башенной испарительной градирни при различной влажности с учетом температур по сухому и влажному термометру. При анализе данных таблицы важно учитывать параметр  $\Delta T_{\text{х. вода}}$ , который отражает разность фактической охла-

жденной воды на выходе из градирни ( $T_{\text{вх}}$ ) и расчетной температуры охлаждающе воды ( $T_{\text{х.вода}}$ ). Модель проверена в следующих диапазонах изменения ключевых параметров: температура охлажденной воды на выходе градирни  $T_{\text{out}}$ : от 31 до  $36^{\circ}\text{C}$ ; давление в конденсаторе  $P_k$ : от 9,5 до

13,5 кПа; температура наружного воздуха  $T_{air}$ : от 25 до 30 °С. Тепловая нагрузка конденсатора и расход циркуляционной

воды соответствовали номинальным (2000 МВт и 148000 т/ч соответственно).



**Рисунок 5.** Номограмма башенной испарительной градирни  
**Figure 5.** Nomogram of the tower evaporative cooling tower

В качестве основного критерия выбрана абсолютная погрешность расчетного значения температуры  $T_{out}$  (и давления  $P_k$ ) относительно измеренного. Дополнительно рассчитана относительная погрешность для давления.

Для калибровки и верификации использованы две характерные точки эксплуатационного режима (усредненные данные за период 2023–2024 гг.): точка №1 – весенний режим работы с  $T_{out} = 31^\circ\text{C}$ ,  $P_k = 9,5$  кПа; точка №2 – летний режим работы с  $T_{out} = 36^\circ\text{C}$ ,  $P_k = 13,5$  кПа.

Промежуточные значения были получены в ходе дополнительных замеров и использованы для оценки точности модели вне точек калибровки.

В точках калибровки (весна, лето) расхождение между моделью и измеренными значениями отсутствует (погрешность равна нулю) за счет адаптации калибруемых параметров. Для независимых промежуточных значений получены следующие результаты:

средняя абсолютная погрешность расчета  $\Delta T_{out} = 0,15^\circ\text{C}$ , максимальная абсолютная погрешность  $0,3^\circ\text{C}$ . Средняя абсолютная погрешность  $\Delta P_k = 0,2$  кПа, максимальная абсолютная погрешность  $0,4$  кПа. Относительная погрешность давления: не более 4 % во всем диапазоне.

Таким образом, в диапазоне  $T_{out} = 31 \div 36^\circ\text{C}$  модель воспроизводит давление в конденсаторе с погрешностью, не превышающей  $0,4$  кПа (или 4 %), что является удовлетворительным для инженерных расчетов и позволяет использовать модель для оценки влияния температуры охлаждающей воды на вакуум в конденсаторе. За пределами указанного диапазона ( $T_{out} < 30^\circ\text{C}$  или  $> 40^\circ\text{C}$ ) точность модели не гарантируется, так как использованная линейная аппроксимация давления может давать существенные отклонения.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработанная математическая модель динамических процессов работы ба-

шенной испарительной градирни Нововоронежской АЭС с погрешностью менее 4% от абсолютного значения давления в конденсаторе описывает теплообмен в системе основной охлаждающей воды энергоблока ВВЭР-1200, может применяться для анализа эффективности системы технического водоснабжения в различных климатических условиях, позволяет количественно оценить влияние температуры окружающей среды на вакуум в конденсаторе и, следовательно, на располагаемую мощность турбоустановки. Результаты исследования могут служить основой для оптимизации режимов работы АЭС в жаркий период года и обоснования мероприятий по борьбе с отложениями.

### Заключение

Проведенный анализ показал, что использование платформы SimInTech позволяет эффективно моделировать сложные процессы, возникающие в рамках проектирования

и эксплуатации АЭС, что способствует более глубокому пониманию динамики систем и повышению надежности проектных решений.

Результаты имитационного моделирования подтвердили возможность оптимизации процессов, связанных с управлением и безопасностью АЭС, а также выявили ключевые факторы, влияющие на их эффективность. Кроме того, разработанные модели могут служить основой для дальнейших исследований и практических приложений, направленных на улучшение проектирования и эксплуатации атомных объектов.

С учетом кинетики образования отложений (коэффициента загрязнения) модель позволит прогнозировать долговременную деградацию охлаждающей способности градирни и планировать объем ремонтных работ. Данный фактор является предметом дальнейших исследований и развития модели.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Поваров В.П., Стацура Д.Б., Усачев Д.Е. Опыт эксплуатации и пути повышения эффективности работы системы технического водоснабжения энергоблоков № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2020;(2):5-16. <https://doi.org/10.26583/npe.2020.2.01>
1. Povarov V.P., Statsura D.B., Usachev D.E. Operating experience and ways to improve the efficiency of the technical water supply system of power units No. 1, 2 of the Novovoronezh AES-2. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2020;(2):5-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2020.2.01>
2. Малинина Т.В., Чишко С.Д. Сравнительная оценка эффективности АЭС и КЭС в электроэнергетике. *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2017;10(1):80-89. Режим доступа: [https://economy.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2017/1/07\\_malinina\\_chishko.pdf?ysclid=mowrgqg02v989114880](https://economy.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2017/1/07_malinina_chishko.pdf?ysclid=mowrgqg02v989114880) (дата обращения: 13.01.2026).
2. Malinina T.V., Chishko S.D. Comparative assessment of NPP and IES efficiency in the electric power industry. *Scientific and technical statements of St. Petersburg State Pedagogical University*. 2017;10(1):80-89. (In Russ.). Available at: [https://economy.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2017/1/07\\_malinina\\_chishko.pdf?ysclid=mowrgqg02v989114880](https://economy.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2017/1/07_malinina_chishko.pdf?ysclid=mowrgqg02v989114880) (accessed: 13.01.2026).
3. Ростунцова И.А., Шевченко Н.Ю. Оценка эффективности схем модернизации системы технического водоснабжения АЭС. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2015;9:612-617. Режим доступа: <https://applied-research.ru/article/view?id=7557&ysclid=mowriyhybs26704563> (дата обращения: 13.01.2026).
3. Rostuntsova I.A., Shevchenko N.Yu. Assessment of efficiency of NPP technical water supply system modernization schemes. *International Journal of Applied and Basic Research*. 2015;9:612-617. (In Russ.). Available at: <https://applied-research.ru/article/view?id=7557&ysclid=mowriyhybs26704563> (accessed: 13.01.2026).
4. Трухний А.Д. Стационарные паровые турбины. Москва: Энергоатомиздат, 1989, 481 с. Режим доступа: [https://rusneb.ru/catalog/000200\\_000018\\_rc\\_223757/?ysclid=mowrl7nejq736046610](https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_223757/?ysclid=mowrl7nejq736046610) (дата обращения: 14.01.2026).
4. Trukhniy A.D. Stationary steam turbines. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 481 p. (In Russ.). Available at: [https://rusneb.ru/catalog/000200\\_000018\\_rc\\_223757/?ysclid=mowrl7nejq736046610](https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_223757/?ysclid=mowrl7nejq736046610) (accessed: 14.01.2026).
5. Поваров В.П., Безручко О.Л., Гусев И.Н., Усачев Д.Е. Паротурбинная установка К-1200-6,8/50. Воронеж: Диамат, 2021. 499 с. Режим доступа: <https://openrepository.mephi.ru/handle/123456789/36829> (дата обращения: 23.01.2026).
5. Povarov V.P., Bezruchko O.L., Gusev I.N., Usachev D.E. Steam turbine plant K-1200-6.8/50. Voronezh: Diamat, 2021. 499 p. (In Russ.). Available at: <https://openrepository.mephi.ru/handle/123456789/36829> (accessed: 23.01.2026).

6. Жмудь В. А. Основные ошибки при оптимизации регуляторов для замкнутых систем управления. *Автоматика и программная инженерия*. 2016;2(16):47-61. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-oshibki-pri-optimizatsii-regulyatorov-dlya-zamknutyh-sistem-upravleniya/viewer> (дата обращения: 23.01.2026).

Zhmud V.A. The main errors in optimizing regulators for closed control systems. *Automation and software engineering*. 2016;2(16):47-61. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-oshibki-pri-optimizatsii-regulyatorov-dlya-zamknutyh-sistem-upravleniya/viewer> (accessed: 23.01.2026).

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Башкиров Г.А.** – разработка программного решения в виде математической модели;

**Данилов А.Д.** – формулировка идеи, выявление проблемы для исследования, разработка программного решения;

**Карандеева Н.В.** – обработка результатов исследования, разработка методологии.

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Bashkirov G.A.** - development of a software solution in the form of a mathematical model;

**Danilov A.D.** – formulation of the idea, identification of a problem for research, development of a software solution;

**Karandeeva N.V.** – processing of research results, development of methodology.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

#### FUNDING:

There is no external funding.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

#### CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Георгий Алексеевич Башкиров**, аспирант Воронежского Государственного Технического Университета г. Воронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

e-mail: bashkirovga@oiate.ru

**Александр Дмитриевич Данилов**, доктор технических наук, профессор Воронежского Государственного Технического Университета, г. Воронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

e-mail: danilov-ad@yandex.ru

**Наталья Владимировна Карандеева**, ведущий инженер по эксплуатации оборудования химического цеха, г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

e-mail: KarandeevaNV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Georgy A. Bashkirov**, postgraduate student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Voronezh region, Russian Federation.

e-mail: bashkirovga@oiate.ru

**Alexander V. Danilov**, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Voronezh region, Russian Federation.

e-mail: danilov-ad@yandex.ru

**Natalya V. Karandeeva**, senior engineer of the chemical department equipment operation, Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

e-mail: KarandeevaNV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Поступила в редакцию / Received 31.01.2026

После доработки / Revision 12.04.2026

Принята к публикации / Accepted 16.04.2026

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ  
OPERATION OF FACILITIES  
NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-07>

УДК 621.039.5

EDN KZGIEQ

Оригинальная статья / Original paper



Нейтронный анализ устойчивых к авариям материалов топливной  
оболочки реакторов ВВЭР-1200 с использованием кода SERPENT

Анисур С.К. Рахман

Управление по регулированию атомной энергии Бангладеш (BAERA),

Администрация Бхабан, Е-12/А, Агаргаон, Дакка-1207, Бангладеш

✉ [ranisur01@gmail.com](mailto:ranisur01@gmail.com)

**Аннотация.** Разрушение твэлов с циркониевой оболочкой в авариях с потерей теплоносителя (LOCA) в первую очередь вызвано экзотермической реакцией циркония с водяным паром между оболочкой твэла и теплоносителем в реакторах типа ВВЭР, что приводит к образованию взрывоопасного водорода и нарушению целостности оболочки. Повышение безопасности твэлов может быть достигнуто путем замены циркониевой оболочки на материалы толерантного топлива (ATF), которые обладают улучшенной стойкостью к высокотемпературному окислению и пониженным взаимодействием с теплоносителем как в нормальных, так и в аварийных условиях. Авария с потерей теплоносителя является проектной аварией для реакторов ВВЭР, что делает разработку альтернативных материалов оболочки приоритетной задачей для атомных электростанций нового поколения. В данном исследовании с помощью подробного моделирования методом Монте-Карло в коде SERPENT для геометрии реактора ВВЭР-1200 изучается эффективный коэффициент размножения ( $K_{eff}$ ) стандартных твэлов с циркониевой оболочкой по сравнению с твэлами, использующими три перспективных материала ATF – сплав FeCrAl, композит SiC и сплав NiCr. Результаты демонстрируют значительные различия между материалами: один кандидат проявляет нейтронное поведение, очень близкое к цирконию, с минимальным влиянием на реактивность; другой показывает умеренное, но растущее влияние на протяжении всей кампании; в то время как третий демонстрирует существенное влияние на реактивность, которое потребовало бы серьезного изменения конструкции активной зоны. Эти количественные результаты подтверждают перспективность отдельных материалов ATF в качестве замены циркония, способствуя снижению рисков окисления, исключению образования водорода и уменьшению вероятности аварий на ядерных реакторах при сохранении приемлемых нейтронно-физических характеристик. Расчеты выполнены специально для атомной электростанции с реактором ВВЭР-1200 и предоставляют необходимые данные для выбора материалов и оптимизации проектирования активной зоны.

**Ключевые слова:** аварии с потерей теплоносителя (LOCA), оболочка реактора, реактор ВВЭР-1200, эффективный коэффициент размножения ( $K_{eff}$ ), топливо, устойчивое к авариям (ATF)

**Для цитирования:** Анисур С.К. Рахман. Нейтронный анализ устойчивых к авариям материалов топливной оболочки реакторов ВВЭР-1200 с использованием кода SERPENT. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(2):67-76. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-07>

**For citation:** Anisur S.K. Rahman. Neutronic analysis of accident-tolerant fuel cladding materials for VVER-1200 reactors using the SERPENT code. *Nuclear Safety*. 2026;16(2):67-76. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-07>

Neutronic analysis of accident-tolerant fuel cladding materials for VVER-1200 reactors  
using the SERPENT code

Анисур С.К. Рахман

Bangladesh Atomic Energy Regulatory Authority (BAERA), Authority Bhaban, E-12/A, Agargaon,

Dhaka-1207, Bangladesh

✉ [ranisur01@gmail.com](mailto:ranisur01@gmail.com)

**Abstract.** The failure of zirconium (Zr) fuel elements in Loss-of-Coolant Accidents (LOCAs) is primarily caused by the exothermic zirconium-steam reaction between the Zr fuel cladding and coolant water in VVER-type reactors, which generates explosive hydrogen gas and compromises cladding integrity. Enhancing fuel element safety can be achieved by replacing the Zr cladding with Accident Tolerant Fuel (ATF) materials that exhibit improved high-temperature oxidation resistance and reduced interaction with coolant under both normal and emergency conditions. LOCA is a design basis accident for VVER reactors, making the development of alternative cladding materials a priority for next-generation nuclear power plants. This study investigates the effective multiplication coefficient (Keff) of standard Zr-clad fuel rods compared to those with three candidate ATF cladding materials – FeCrAl alloy, SiC composite, and NiCr alloy—using detailed Monte Carlo simulations with the SERPENT code for the VVER-1200 reactor geometry. The results demonstrate significant differences among the materials: one candidate exhibits neutronic behavior very close to zirconium with minimal reactivity control, another shows a moderate but increasing penalty throughout the burnup cycle, while the third displays a substantial reactivity control that would necessitate major core redesign. These quantitative findings highlight the promise of select ATF materials as replacements for Zr, contributing to reduced oxidation risks, elimination of hydrogen generation, and decreased accident probabilities in nuclear reactors while maintaining acceptable neutronic performance. The calculations are specifically performed for the WWER-1200 nuclear power plant and provide essential data for material selection decisions and core design optimization.

**Keywords:** Loss-of-Coolant Accidents (LOCA), Cladding, WWER-1200 reactor, Effective multiplication coefficient (Keff), Accident Tolerant Fuel (ATF)

## 1. Introduction

Accident Tolerant Fuel (ATF) is designed to endure loss-of-cooling scenarios in a reactor core for extended durations compared to traditional zirconium (Zr) cladding fuel. By enhancing the safety margins of nuclear power plants, ATF contributes to improved operational efficiency through long-life fuel, supports the current nuclear power plant fleet, facilitates the licensing of advanced reactor technologies, and reduces operational and maintenance costs<sup>1,2,3</sup>, ultimately benefiting consumers through lower electricity costs. The 2011 Fukushima Daiichi nuclear accident served as a stark reminder of the vulnerabilities associated with conventional zirconium-based (Zr) fuel cladding materials under extreme conditions, particularly in Loss-of-Coolant Accidents (LOCAs). During such accidents, Zr reacts with steam at elevated temperatures, generating hydrogen gas—a key factor in hydrogen explosions that exacerbated the severity of the Fukushima disaster. Although much attention has been given to this event, the

challenges with Zr cladding extend beyond this high-profile incident. Its chemical reactivity and susceptibility to rapid oxidation under accident conditions remain critical areas of concern for modern nuclear reactors. This underscores the urgent need for alternative cladding materials, especially for advanced reactor designs such as the VVER-1200, which operate with unique neutronic and thermal characteristics. The VVER-1200, as a Generation III+ reactor, benefits significantly from the incorporation of Accident Tolerant Fuel (ATF) materials. These materials—such as FeCrAl, SiC, and NiCr—address the limitations of Zr cladding by offering superior resistance to high-temperature oxidation and reduced hydrogen production during LOCA scenarios. Moreover, the inclusion of ATF materials enhances fuel burnup, reactivity control, and safety margins, ensuring improved performance and resilience under both normal and accident conditions [1,2].

This study leverages the SERPENT Monte Carlo code to perform a detailed neutronic analysis of the multiplying coefficient characteristics of ATF materials in a VVER-1200 reactor core. By evaluating the safety and operational benefits of these materials, the research highlights their potential to mitigate the risks associated with Zr cladding while aligning with the safety objectives of next-generation nuclear power plants. The findings not only address the legacy challenges underscored by past accidents but also pave the way for safer, more efficient

<sup>1</sup> IAEA. Accident Tolerant Fuel Concepts for Light Water Reactors. IAEA TECDOC Series, No. 1797. Vienna: *International Atomic Energy Agency*. 2015. Available at: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE1797web.pdf> (accessed: 01.02.2026)

<sup>2</sup> World Nuclear News. (2023, March). First Framatome ATF fuel loaded at US reactor. Available at: <https://world-nuclear-news.org/> (accessed: 01.02.2026)

<sup>3</sup> OECD Nuclear Energy Agency. JANIS Online version. Available at: <https://www.oecd-nea.org/janis/> (accessed: 01.02.2026)

nuclear fuel technologies tailored to advanced reactor designs [3,4].

## 2. Short Description of the SERPENT Program

The SERPENT code is a state-of-the-art Monte Carlo neutron transport simulation tool primarily written in ANSI-C programming language. Initially developed for the Linux operating system, SERPENT has also been successfully compiled and tested on macOS and various UNIX-based systems.

The Monte Carlo method, which underpins SERPENT's computational framework, relies on probabilistic techniques for solving neutron transport equations. This approach is computationally intensive, and the efficiency of calculations is directly influenced by the available processing power.

SERPENT was originally designed as a simplified neutron transport code for reactor physics applications, with an emphasis on usability and reduced computational overhead. Over time, it has evolved to include advanced capabilities, such as burnup calculations for reactor fuel analysis.

Today, SERPENT is utilized in a wide range of applications, including:

- Generating group constants for deterministic reactor physics codes.
- Modeling and simulation of coupled multi-physics systems.
- Detailed studies of nuclear reactor core designs and materials.

Its versatility and efficiency have made SERPENT a valuable tool in nuclear engineering research and development.

## 3. Description of the Calculation Model

The fuel rod geometry used in this study is based on the VVER-1200 reactor design and is divided into five distinct zones, each with a specific radius and material composition (Fig. 1):

### Zone 1: Helium Gas Gap

Radius: 0.1 cm.

Material: Helium gas, used as a buffer layer to accommodate thermal expansion and maintain structural integrity.

### Zone 2: Fuel Region

Radius: 0.39 cm.

Material: Uranium dioxide ( $U^{235}$ ) as the fissile material. This zone contains the fuel that undergoes nuclear fission.

### Zone 3: Clearance Gap

Material: A small clearance region to account for thermal and mechanical expansion during operation.

### Zone 4: Cladding

- Inner Radius: 0.395 cm.
- Outer Radius: 0.455 cm.
- Thickness: 0.06 cm.

Material: Different types of cladding materials are analyzed for their performance under operational and accident conditions. It is important to note that this study considers a complete replacement of the standard Zirconium alloy cladding (E110) with a monolithic layer of the candidate ATF material (FeCrAl alloy, SiC composite, or NiCr alloy). The modeling of thin protective coatings on a Zirconium substrate, which presents a more complex heterogeneous structure requiring different computational approaches, is beyond the scope of this investigation and is planned for future work.

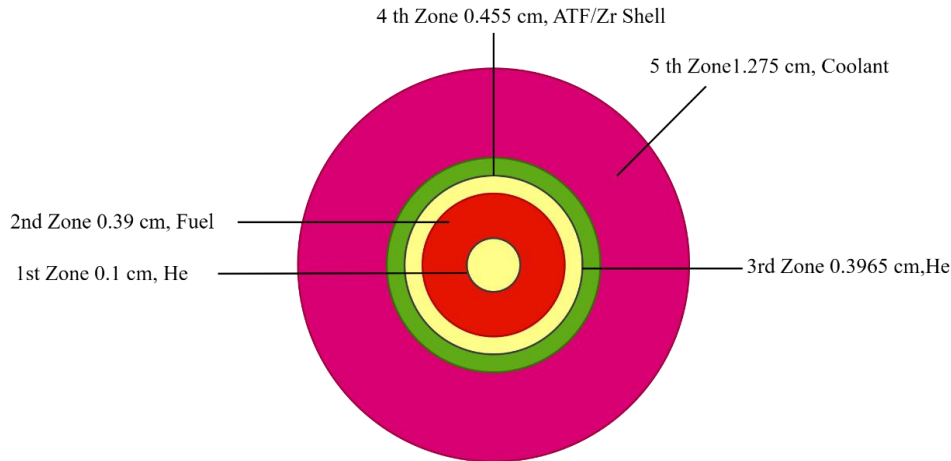
The material compositions and densities are:

- **Zr (reference):** E110 alloy (Zr-1%Nb), density 6.55 g/cm<sup>3</sup>
- **FeCrAl alloy:** Composition: Fe-13Cr-5Al (wt.%), density 7.1 g/cm<sup>3</sup>
- **SiC composite:** Stoichiometric SiC, density 3.21 g/cm<sup>3</sup> (fully dense)
- **NiCr alloy:** Composition: Ni-20Cr (wt.%), density 8.4 g/cm<sup>3</sup>

### Zone 5: Coolant Zone

Material: Water, serving as both a coolant and a neutron moderator to sustain the fission chain reaction.

This multi-zone model reflects the detailed structure of a VVER-1200 fuel rod and provides the basis for evaluating the neutronic characteristics and thermal performance of various cladding materials. The calculations performed in this study assess the impact of these materials on the multiplying coefficient and other critical reactor safety parameters [5,6,7].



**Figure 1.** Fuel rod including ATF cladding materials<sup>4</sup>

#### 4. Configuration and main characteristics of the VVER-1200 core

The fuel assembly of the VVER-1200 reactor is an advanced design optimized for safety, fuel efficiency, and operational longevity. Its structure includes the following components in figure 2:

1. 285 Fuel Cells (UO<sub>2</sub>):

These cells contain uranium dioxide (UO<sub>2</sub>) fuel pellets.

The primary driver of the fission reaction, responsible for generating heat for electricity production.

2. 27 Fuel Cells with Gadolinium (Burnable Absorbers):

These cells incorporate gadolinium (Gd) as a burnable neutron absorber.

Gadolinium helps manage excess reactivity at the beginning of the fuel cycle and ensures a more uniform burn-up of fuel over time.

3. 18 Guide Tube Cells:

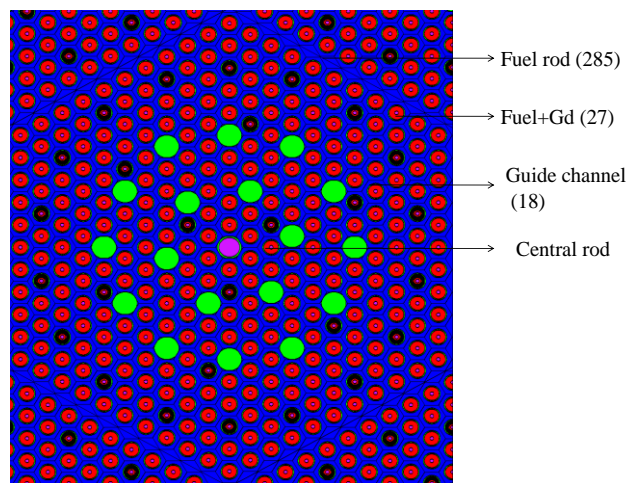
These cells house guide tubes for control rods.

The control rods are used for reactivity regulation, providing both operational control and emergency shutdown capabilities.

4. 1 Central Tube Cell:

Located at the center of the assembly, typically used for instrumentation or coolant flow optimization.

The key characteristics of the VVER-1200 reactor core are presented in Table 1.



**Figure 2.** Fuel Assembly

<sup>4</sup> It is important, that the analysis considers a complete replacement of the standard Zirconium alloy cladding with FeCrAl, SiC, and NiCr ATF material. The modeling of thin protective coatings on a Zirconium substrate, which presents a more complex heterogeneous structure, is beyond the scope of this study and is planned for future work.

**Table 1.** Core composition of VVER-1200 reactor

Parameter Name	Value
Reactor thermal power (MWt)	3200
Reactor electrical power (MWt)	1200
Number of fuel assembly in the core	163
Coolant temperature at the reactor inlet (°C)	298 ± 2.5
Average coolant temperature at the reactor outlet (°C)	329 ± 5.0
Active core diameter (cm)	316
Active core height (cm)	375
Refueling frequency (months)	12 (18)
Primary coolant temp. at core inlet (°C)	298.2
Primary coolant temp. at core outlet (°C)	328.9
Primary coolant pressure at reactor vessel outlet (MPa)	16.2
Feed water temperature at SG inlet (°C)	225
Assembly Fuel assembly form	Hexagonal
Number of fuel rod in the fuel assembly	312
Fresh fuel assembly enrichment	1.6%, 2.4%, 3.6%, 4.95%
Fuel rod pitch (mm)	12.75
The number of fuel rods, material, internal and external diameter of the cladding of the fuel rod accordingly	285, Alloy E110, 7.80·10 <sup>-3</sup> m, 9.10·10 <sup>-3</sup> m
Number of teqs (fuel+Gd), material, internal and external diameter of the cladding of the teqs (fuel+ Gd) rod accordingly	27, Alloy E110, 7.80·10 <sup>-3</sup> m, 9.10·10 <sup>-3</sup> m
The internal diameter of the cladding of a fuel rod / teg (Fuel+Gd)	7.93·10 <sup>-3</sup> m
Fuel enrichment of teqs, <sup>235</sup> U, вес. %	4.0
Content Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , вес. %	8
Lattice pitch of fuel elements,	12.75·10 <sup>-3</sup> m
Guide channel: Its materials, internal and external diameter accordingly	Alloy E635, 13.0·10 <sup>-3</sup> m, 11.0·10 <sup>-3</sup> m
Central rod: Its materials, internal and external diameter accordingly	Alloy E635, 13.0·10 <sup>-3</sup> m, 11.0·10 <sup>-3</sup> m

## 5. Discussion on Accident Tolerant Fuel (ATF) Materials

Accident Tolerant Fuel refers to nuclear fuel and cladding materials that enhance the safety and efficiency of nuclear reactors, particularly under accident conditions, such as loss of coolant accidents (LOCA). Accident Tolerant Fuel (ATF) cladding materials, such as NiCr, SiC, and FeCrAl, have been proposed as alternatives or enhancements to conventional zirconium (Zr) cladding. These materials aim to improve the performance and safety of nuclear power plants under both normal operation and accident conditions.

Zirconium, while commonly used for fuel cladding due to its excellent neutron transparency, is chemically active at elevated temperatures. It reacts with water vapor at temperatures above 500–600°C, and at temperatures exceeding 900°C, this reaction becomes highly exothermic, producing significant amounts of hy-

drogen. The reaction can be represented as:  $Zr+2H_2O \rightarrow ZrO_2+2H_2$ .

This reaction poses a severe risk as it can lead to cladding failure and hydrogen explosions. To mitigate these risks, alternative cladding materials are needed to reduce oxidation and improve thermal stability, ensuring safe operation of nuclear power plants under both normal and accident conditions.

### 5.1 Zirconium Alloy with Chromium Coating

Zirconium cladding with chromium coatings has gained significant attention due to chromium's thermodynamic and corrosion-resistant properties. While Zr forms a highly durable ZrO layer at high temperatures, it undergoes phase transformations above certain thresholds, weakening its structural integrity. Chromium oxide (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) forms a robust barrier to oxygen diffusion, which helps to mitigate oxidation and hydrogen generation.

### Advantages of Chromium Coatings:

- **High Melting Point:** Improves resilience under high-temperature conditions.
- **Corrosion Resistance:** Performs well in superheated water environments, withstanding temperatures up to 1000°C.
- **Thermal Conductivity:** Enhances heat dissipation, reducing thermal stress.

Due to these properties, many nuclear power-producing nations have begun implementing chromium-coated cladding materials for advanced reactor designs.

### 5.2 Silicon Carbide (SiC) Composites

Silicon Carbide (SiC) is another promising ATF cladding material due to its exceptional high-temperature strength, stability under irradiation, and lower oxidation rates compared to Zr. SiC remains stable in water vapor environments at temperatures up to 1200°C and has superior material properties, including [9,10]:

- **Melting Point:** 2800°C, providing high thermal resilience.
- **Thermal Conductivity:** 25 W/m·K, ensuring effective heat transfer.
- **Irradiation Stability:** Maintains structural integrity under neutron exposure.

For the ATF, FeCrAl, SiC, and NiCr alloys each offer significant advantages over Zr cladding materials, especially in terms of safety during accident scenarios.

– FeCrAl alloys provide superior oxidation resistance and hydrogen management, which are crucial for preventing accidents such as hydrogen explosions. However, their neutron absorption properties require careful reactor design consideration [8].

– SiC composites outperform Zr in high-temperature stability and oxidation resistance and do not produce hydrogen, making them a highly promising candidate for accident-tolerant cladding. However, their mechanical brittleness and fabrication challenges are potential drawbacks<sup>5</sup>.

– NiCr alloys share some similarities with

FeCrAl but are typically less studied in the context of ATF. They may provide comparable oxidation resistance, but like FeCrAl, they can affect reactivity due to their neutron absorption characteristics.

### 6. Result Calculation by the SERPENT Program

Among the various Accident Tolerant Fuel (ATF) cladding options, FeCrAl alloys have emerged as a promising candidate for next-generation nuclear reactors. FeCrAl alloys typically contain 10-15 wt.% chromium (Cr) and 3-6 wt.% aluminum (Al). These alloys exhibit exceptional resistance to high-temperature oxidation due to the formation of a protective chromium oxide (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) layer, which is stable up to temperatures around 1000°C. At temperatures above 1000°C, the chromium oxide layer is replaced by a more durable aluminum oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) layer. The dense Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layer serves as an effective barrier against oxidizing species, including O<sup>2-</sup>, OH<sup>-</sup>, and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, thereby preventing further oxidative degradation of the material.

One of the key advantages of FeCrAl alloys, especially with the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> protective layer, is their significantly reduced hydrogen permeability. Studies have shown that the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layer reduces hydrogen permeation by a factor of three when compared to the oxidized FeCrAl material. In contrast, the zirconium-based (Zr) cladding currently used in nuclear reactors is prone to significant hydrogen absorption. When Zr reacts with hydrogen, zirconium hydrides (ZrH<sub>2</sub>) are formed, which migrate to the outer surface of the cladding. This migration reduces the mechanical properties of the cladding, such as the fracture toughness and fatigue resistance. Thus, the stable oxide layer in FeCrAl alloys provides a significant advantage in hydrogen management compared to Zr alloys, which form brittle hydride phases.

Using the SERPENT code, the effective multiplication coefficient (K<sub>eff</sub>) was calculated as a function of burnup time for fuel rods with different cladding materials. Burnup calculations were performed up to 500 effective full power days, corresponding to a fuel burnup of approximately 40-45 MWd/kgU. Table 2 presents the calculated K<sub>eff</sub> values with their associated statistical errors.

<sup>5</sup> IAEA. (2020). Accident Tolerant Fuel Concepts for Light Water Reactors (ATF-TM-2). Proceedings of a Technical Meeting held in Moscow, Russian Federation, 2019. IAEA-TECDOC-1921. Available at: <https://www.iaea.org/publications/10972/accident-tolerant-fuel-concepts-for-light-water-reactors> (accessed: 01.02.2026)

**Table 2.** Effective Multiplying Coefficient (Keff) with statistical error for the Zr alloy and Zirconium (Zr) coated with FeCrAl, NiCr and SiC respectively are calculated by using the SERPENT program

Burnup (Days)	Alloy Zr (Reference) Effective Multiplying Coefficient (Keff) with Error	Alloy (Zr+FeCrAl) Effective Multiplying Coefficient (Keff) with Error	Alloy (Zr+SiC) Effective Multiplying Coefficient (Keff) with Error	Alloy (Zr+NiCr) Effective Multiplying Coefficient (Keff) with Error
0	1.33567 ± 0.00042	1.30383 ± 0.00044	1.32645 ± 0.00043	1.19550 ± 0.00048
50	1.35175 ± 0.00041	1.30429 ± 0.00043	1.34535 ± 0.00042	1.20763 ± 0.00047
100	1.36357 ± 0.00040	1.28874 ± 0.00045	1.35482 ± 0.00041	1.20808 ± 0.00047
150	1.34702 ± 0.00042	1.26717 ± 0.00046	1.33484 ± 0.00042	1.18587 ± 0.00048
200	1.32290 ± 0.00043	1.24125 ± 0.00047	1.31956 ± 0.00043	1.15958 ± 0.00049
250	1.30366 ± 0.00044	1.21555 ± 0.00048	1.29477 ± 0.00044	1.13095 ± 0.00050
300	1.28041 ± 0.00045	1.18902 ± 0.00049	1.26769 ± 0.00045	1.09880 ± 0.00051
450	1.21590 ± 0.00047	1.11726 ± 0.00052	1.20659 ± 0.00046	1.02288 ± 0.00054
500	1.13523 ± 0.00050	1.02648 ± 0.00055	1.12443 ± 0.00048	0.928448 ± 0.00058

To quantify of the reactivity degradation associated with each ATF material, the relative change in the effective multiplication factor ( $\Delta K_{eff}$ ) compared to the reference Zirconium cladding was calculated at the beginning of life (0 burnup days) and after 500 days. The results are summarized in Table 3, with errors propagated from the Monte Carlo statistics.

**Table 3.** Relative change in Keff compared to Zirconium cladding with propagated errors

Material	$\Delta K_{eff}$ at 0 days	$\Delta K_{eff}$ at 500 days
FeCrAl	-2.38% ± 0.05%	-9.58% ± 0.08%
SiC	-0.69% ± 0.04%	-0.95% ± 0.06%
NiCr	-10.49% ± 0.06%	-18.22% ± 0.09%

The analysis shows that SiC has the closest neutronic behavior to Zirconium, with a minimal reactivity (less than 1% throughout the cycle). FeCrAl demonstrates a moderate reactivity, which increases with burnup. NiCr, however, exhibits a severe reactivity reduced (over 10% at BOL), rendering it less attractive from a neutronic perspective without significant core design modifications to compensate for the reactivity loss.

The results presented here graphically, which provides a detailed neutronic analysis of the

FeCrAl alloys and their performance within the reactor core. The relationship between the multiplying coefficient and burnup in a VVER reactor (or any other nuclear reactor) is typically inverse. This means that as burnup increases, the multiplying coefficient (which represents the reactor's reactivity) decreases over time. This decrease occurs because, as the reactor operates, fissile isotopes are consumed through nuclear fission. The depletion of these isotopes reduces the number of available fissile nuclei for neutron-induced fission reactions, leading to a decline in the multiplication factor. In the case of Accident Tolerant Fuel (ATF) materials like FeCrAl and SiC, burnup can increase significantly, reaching values of up to 80 MWd/kgU. These findings, highlight the improved safety and material performance of FeCrAl, SiC, NiCr alloys, positioning them as viable alternatives for the next generation of nuclear fuel cladding materials.

The errors in all calculations are very small (within ±0.0006), which is about ±0.04-0.06% (Tab. 2) in relative terms. This means the results are very precise, shown in figure 3.

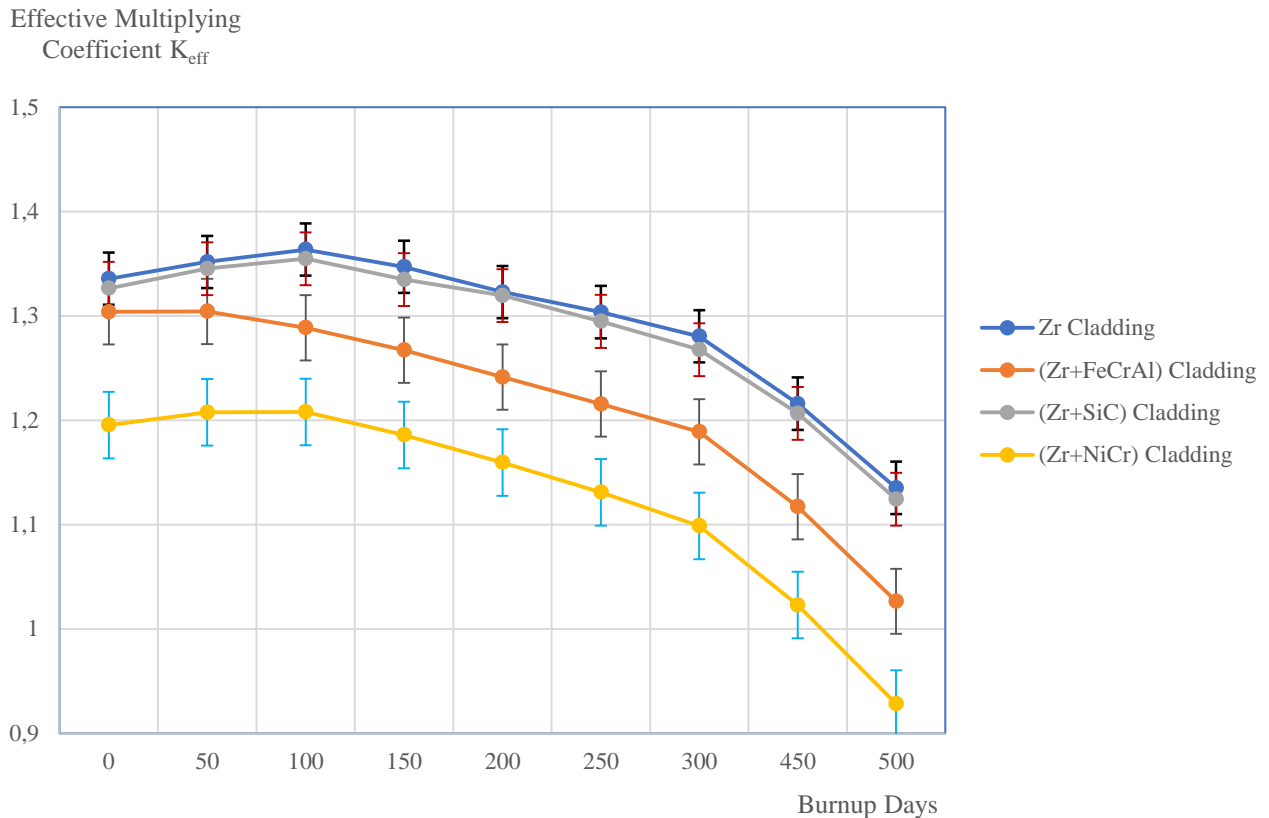


Figure 3. Multiplying Coefficient vs Burnup time for Accident Tolerant Fuel (ATF) materials with error bands

## 7. Result Analysis on Accident Tolerant Fuel (ATF)

### 7.1 Neutronic Performance and Reactivity degradation

The calculated  $K_{eff}$  values presented in Table 2 clearly demonstrate a reactivity degradation associated with ATF cladding materials relative to reference Zr cladding.

At beginning of cycle (0 days burnup):

Zr: 1.33567

Zr+SiC: 1.32645  $\rightarrow \Delta K \approx -0.009$   
( $\approx -670$  pcm)

Zr+FeCrAl: 1.30383  $\rightarrow \Delta K \approx -0.032$   
( $\approx -2400$  pcm)

Zr+NiCr: 1.19550  $\rightarrow \Delta K \approx -0.140$   
( $\approx -10,500$  pcm)

The observed trend directly correlates with the microscopic thermal neutron absorption cross-sections of the cladding materials:

Zr  $\approx 0.18$  barns

SiC (effective)  $\approx$  very low absorption (Si and C both weak absorbers)

FeCrAl  $\approx \sim 2-3$  barns (Cr and Fe contribution)

NiCr  $\rightarrow$  significantly higher absorption due to Ni ( $\sim 4.5$  barns)

SiC demonstrates the smallest reactivity reduced because both silicon and carbon have low absorption cross-sections and therefore minimally perturb the neutron economy of the lattice. NiCr exhibits the largest reduction in  $K_{eff}$  due to the relatively high microscopic absorption cross-section of nickel, leading to increased parasitic neutron absorption and reduced multiplication. FeCrAl shows intermediate behavior, consistent with its moderate absorption characteristics. Thus, the neutronic performance ranking based on calculated data is:

SiC  $\rightarrow$  FeCrAl  $\rightarrow$  NiCr

This ranking is directly supported by the quantitative SERPENT results.

### 7.2 Implications for Fuel Cycle and Core Design

The reduction in  $K_{eff}$  directly affects excess reactivity and therefore impacts fuel cycle length and core design strategy.

For FeCrAl and especially NiCr, the reactivity degradation would:

- Reduce initial excess reactivity.
- Shorten achievable fuel cycle length under fixed enrichment.
- Require compensation through:
  - Increased  $^{235}\text{U}$  enrichment,
  - Reduced burnable absorber ( $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ) loading,
  - Modified fuel assembly design.

In contrast, SiC introduces only a minor reactivity degradation, which could likely be compensated within standard enrichment margins without major design modification. The substantial reactivity degradation observed for NiCr (~10,000 pcm at BOC) suggests that its implementation in WWER-1200 would require substantial redesign of enrichment zoning and burnable absorber distribution, potentially affecting economic performance.

Therefore, from a neutronic perspective:

- SiC appears most compatible with existing WWER-1200 core design.
- FeCrAl may be feasible with moderate design adjustments.
- NiCr presents significant neutronic challenges.

### 7.3 Error Analysis

The statistical errors in the Monte Carlo calculations are sufficiently small to resolve the differences between materials. The 95% confidence intervals for the reactivity penalties are:

- FeCrAl at 0 days:  $\pm 0.10\%$  (relative penalty clearly distinguishable from zero)
- SiC at 0 days:  $\pm 0.08\%$  (penalty small but statistically significant)
- NiCr at 0 days:  $\pm 0.12\%$  (penalty clearly significant)

The small error ranges show that the ranking of the materials is reliable and not caused by random statistical variation.

## 8. Conclusion

This work presents a consistent Monte Carlo-based neutronic comparison of zirconium and three ATF cladding options for

a VVER-1200 lattice cell under identical geometric, material, and burnup conditions. The novelty of the study lies in the direct quantification of the reactivity degradation introduced by each candidate material within a unified SERPENT modeling framework. The calculations demonstrate that the magnitude of  $K_{\text{eff}}$  reduction is primarily governed by the microscopic absorption cross-sections of alloying elements, particularly nickel and chromium. The results show that:

1. The neutronic impact of SiC is minimal and remains within typical operational reactivity margins across the burnup range considered. SiC has the best neutronic performance. It causes only a small reactivity loss (less than 1%), so it could replace Zr without major design changes.

2. FeCrAl produces a systematic and burnup-dependent reactivity suppression that would require compensatory core design measures. It causes a moderate and increasing reactivity loss (about 2-10%). It may require slightly higher fuel enrichment or design adjustments.

3. NiCr causes a substantial parasitic absorption effect, leading to a reactivity loss that exceeds practical compensation limits under standard enrichment assumptions for VVER-1200. It has very poor neutronic performance. It causes large reactivity loss (over 10-18%) and would need major core redesign.

The study confirms that the choice of ATF cladding involves a trade-off between enhanced accident tolerance and neutronic performance. The quantitative results obtained for the VVER-1200 provide a necessary basis for more comprehensive multi-physics optimizations, where the identified reactivity penalties must be balanced against the significant safety gains in oxidation resistance and hydrogen reduction offered by these materials. The errors are very small ( $\pm 0.04\text{-}0.06\%$ ), so the material comparison is reliable and statistically significant.

## REFERENCES

1. Alhmoud A.Z., Kruglov V.B., Kruglov A.B., Tanash, H.A. Tolerant fuel for VVER reactors. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020;1689 012069. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1689/1/012069>
2. Yadav K.K., Pal, U., & Karthikeyan, R. Concept of accident tolerant fuel in nuclear reactors. *Nuclear and Particle Physics Proceedings*, 2023;341:62-66. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2023.09.026>

3. Zinkle S.J., Terrani, K. A., Gehin, J. C., Ott, L. J., & Snead, L. L. Accident tolerant fuels for LWRs: A perspective. *Journal of Nuclear Materials*. 2014;448(1-3):374-379. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.12.005>
4. Terrani K.A. Accident tolerant fuel cladding development: Promise, status, and challenges. *Journal of Nuclear Materials*. 2018;501:13-30. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.12.043>
5. Anisur, R. S. K., & Uvakin, M. A. Uncertainty analysis in the physical calculation of VVER cells in the daily maneuvering schedule. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018;1133 012048. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1133/1/012048>
6. Rahman A.S.K., & Uvakin, M. A. Compare the Result of Uncertainty Analysis in the Physical Calculations of WWER Cells in the Daily Maneuvering Schedule by GETERA and WIMS Programs. *Global Nuclear Safety*, 2019;1(30):90-100. Available at: <http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/en.2019.1.3.2.pdf> (accessed: 01.02.2026)
7. Rahman A.S.K., Uvakin M.A. Investigation of the power peaking factor Kq in the fuel assembly during the maneuvering mode of the VVER-1000 reactor. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1689 012029. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1689/1/012029>
8. Lance L Snead, Takashi Nozawa, Yutai Katoh, Thak-Sang Byun, Sosuke Kondo, David A. Petti. Handbook of SiC properties for fuel performance modeling. *Journal of Nuclear Materials*. 2007;371(1-3):329-377. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2007.05.016>

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без дополнительных источников финансирования

## FUNDING:

No additional funding.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## CONFLICT OF INTEREST:

The author declare no conflict of interest.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ:

**Анисур С.К. Рахман**, старший научный сотрудник, Управление по регулированию атомной энергии Бангладеш (БАЭРА), Агаргаон, Дакка-1207, Бангладеш. <https://orcid.org/0000-0001-7803-8234>  
WosResearcher ID: D-3381-2019  
e-mail: ranisur01@gmail.com

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR:

**Anisur S.K. Rahman**, Senior Scientific Officer (SSO) Bangladesh Atomic Energy Regulatory Authority (BAERA), Authority Bhabon, E-12/A, Agargaon, Dhaka-1207, Bangladesh. <https://orcid.org/0000-0001-7803-8234>  
WosResearcher ID: D-3381-2019  
e-mail: ranisur01@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 01.02.2026  
После доработки / Revision 06.04.2026  
Принята к публикации / Accepted 09.04.2026

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ  
OPERATION OF FACILITIES  
NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-08>

УДК 621.039.56:536.2

EDN NOQXES

Оригинальная статья / Original paper




## Нейтронно-шумовые методы контроля поканальной скорости теплоносителя в активной зоне

Г.В. Аркадов<sup>1</sup> , М.Т. Слепов<sup>2</sup>  

<sup>1</sup> Некоммерческое партнерство содействию развитию системной инженерии «Райз», г. Москва,  
Российская Федерация

<sup>2</sup> Филиал Акционерного общества «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на  
атомных станциях» «Нововоронежская атомная станция», г. Нововоронеж, Воронежская область,

Российская Федерация

 [tymofecht@yandex.ru](mailto:tymofecht@yandex.ru)

**Аннотация.** В представленной статье, авторами обсуждаются вопросы измерения скорости теплоносителя с помощью нейтронно-шумовой технологии. Шумовой метод оценки поканальной скорости теплоносителя по флуктуациям внутризонного нейтронного потока широко применялся для чехловых ТВС ВВЭР-440. Для вычисления скорости теплоносителя необходимо оценить время запаздывания сигналов двух датчиков прямого заряда частотным методом по локальным экстремумам их функции когерентности. Выведено уравнение чистого транспорта температурных флуктуаций. Другие случаи – наличие глобального нейтронного шума, некоррелированных шумов по каждому измерительному каналу не рассматриваются. Для безчехловых ТВС реакторных установок (РУ) ВВЭР-1200 авторами учтены горизонтальные перетечки теплоносителя между соседними ТВС. Произведена оценка ошибки в определении скорости теплоносителя. Введены понятия *sink*-структур и *sink*-частот, которые являются бесконечной последовательностью, периодических экстремумов – максимумов и минимумов – спектральных функций, возникающую из-за тригонометрических множителей или слагаемых типа  $\sin(\omega\tau_0)$ ,  $\cos(\omega\tau_0)$ ,  $\sin\frac{\omega\tau_0}{2}$ ,  $\cos\frac{\omega\tau_0}{2}$ ,  $\frac{\sin(\omega\tau_0)}{\omega\tau_0}$ . Кратко описаны отличия ТВС-5 от штатных ТВС для РУ ВВЭР-1200. Впервые произведена оценка скорости теплоносителя в ТВС-5 и произведено сравнение со скоростью в штатных ТВС для четырех моментов времени. Обоснована необходимость мониторинга поканальных расходов теплоносителя для выявления ТВС со стабильно низким и стабильно высоким расходом теплоносителя. Указанные состояния могут быть обусловлены конкретной нагрузкой активной зоны, неизменными конструктивными особенностями РУ с ВВЭР-1200, а именно, с диаметрами труб в блоке защитных труб (БЗТ) над данной ТВС, близостью выгородки активной зоны, наличием сборки внутриреакторных детекторов (СВРД) и каналов термомониторинга в данной ТВС.

**Ключевые слова:** тепловыделяющая сборка пятого поколения (ТВС-5), нейтронно-шумовой контроль, спектр, когерентность, ВВЭР-1200, датчик прямого заряда, спектральные максимумы, собственные частоты, скорость теплоносителя

**Для цитирования:** Аркадов Г.В., Слепов М.Т. Нейтронно-шумовые методы контроля поканальной скорости теплоносителя в активной зоне. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(2):77-90. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-08>

**For citation:** Arkadov G.V., Slepov M.T. Neutron noise control methods for channel-by-channel coolant flow rate in the core. *Nuclear Safety*. 2026;16(2):77-90. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-08>

### Neutron noise control methods for channel-by-channel coolant flow rate in the core

Gennady V. Arkadov<sup>1</sup> , Mikhail T. Slepov<sup>2</sup>  

<sup>1</sup> Non-profit Partnership for the Promotion of System Engineering «Rise», Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Branch of the Joint-Stock Company «Russian Concern for the Production of Electric and Thermal Energy at Nuclear Power Plants» Novovoronezh Nuclear Power Plant, Novovoronezh, Voronezh Region, Russian Federation

**Abstract.** In the presented article, the authors discuss the issues of measuring the coolant flow rate using neutron noise technology. The noise method for estimating the channel-by-channel coolant flow rate based on fluctuations in the intraband neutron flux has been widely used for VVER-440 cover fuel assemblies. To calculate the coolant flow rate, it is necessary to estimate the delay time of the signals of two direct charge sensors using the frequency method based on the local extremes of their coherence function. The equation of pure transport of temperature fluctuations is derived. Other cases are the presence of global neutron noise, uncorrelated noise on each measuring channel is not considered. The authors took into account horizontal coolant overflows between neighboring fuel assemblies for shell-less fuel assemblies of VVER-1200 reactor installations. The error in determining the coolant flow rate has been estimated. The concepts of sink structures and sink frequencies are introduced, which are an infinite sequence of periodic extrema – maxima and minima – spectral functions arising from trigonometric multipliers or terms of the type  $\sin(\omega\tau_0)$ ,  $\cos(\omega\tau_0)$ ,  $\sin \frac{\omega\tau_0}{2}$ ,  $\cos \frac{\omega\tau_0}{2}$ ,  $\frac{\sin(\omega\tau_0)}{\omega\tau_0}$ . The differences between the fuel assemblies -5 and the standard fuel assemblies for the VVER-1200 are briefly described. For the first time, the coolant flow rate in fuel assemblies-5 was estimated and compared with the speed in standard fuel assemblies for four time points. The necessity of monitoring channel-by-channel coolant flow rates is substantiated in order to identify fuel assemblies with consistently low and consistently high coolant flow rates. These conditions may be due to the specific loading of the core, the invariable design features of VVER-1200, namely, the diameters of the pipes in the blast furnace above this fuel assembly, the proximity of the core enclosure, the presence of an air defense system and thermal control channels in this fuel assembly.

**Keywords:** fifth generation fuel assembly (TVS-5), neutron noise control, spectrum, coherence, VVER-1200, direct charge sensor, spectral maxima, natural frequencies, coolant flow rate

## Введение

Для исследования внутриреакторного (внутризонного) нейтронного шума используются сигналы датчиков прямого заряда (ДПЗ) из состава сборок внутриреакторных детекторов (СВРД). ДПЗ является устройством, обеспечивающим непосредственное преобразование ядерной энергии в электрическую без всяких промежуточных этапов и, в сущности, является источником тока, разность потенциалов на электродах которого создается за счет использования энергии заряженных частиц. В случае регистрации нейтронов ток ДПЗ обусловлен реакцией взаимодействия нейтронов с нейтроночувствительным элементом детектора. Практическое применение в настоящее время получили ДПЗ, использующие в качестве носителей тока электроны (подробнее в источнике [1]). Всего по активной зоне (АЗ) ВВЭР-1200 равномерно расположены 54 СВРД в трех конструктивных исполнениях. При этом каждая СВРД имеет в составе по 7 индивидуальных ДПЗ, что позволяет говорить о 378 отдельных каналах, измеряющих внутриреакторный нейтронный поток. Состав СВРД, типы и особенности конструкции описаны в руководстве по экс-

плуатации<sup>1</sup>, а краткие сведения об использованных в эксперименте ДПЗ сведены в таблице 1. На рисунке 1 представлены временные реализации флюктуаций тока 2 ДПЗ для верха АЗ (позиция 7 в СВРД) – рисунок 1а, для низа АЗ (позиция 1 в СВРД) – рисунок 1б.

**Таблица 1.** Метрологические и технические характеристики датчика прямого заряда в составе СВРД (составлено по Руководству по эксплуатации<sup>1</sup>)

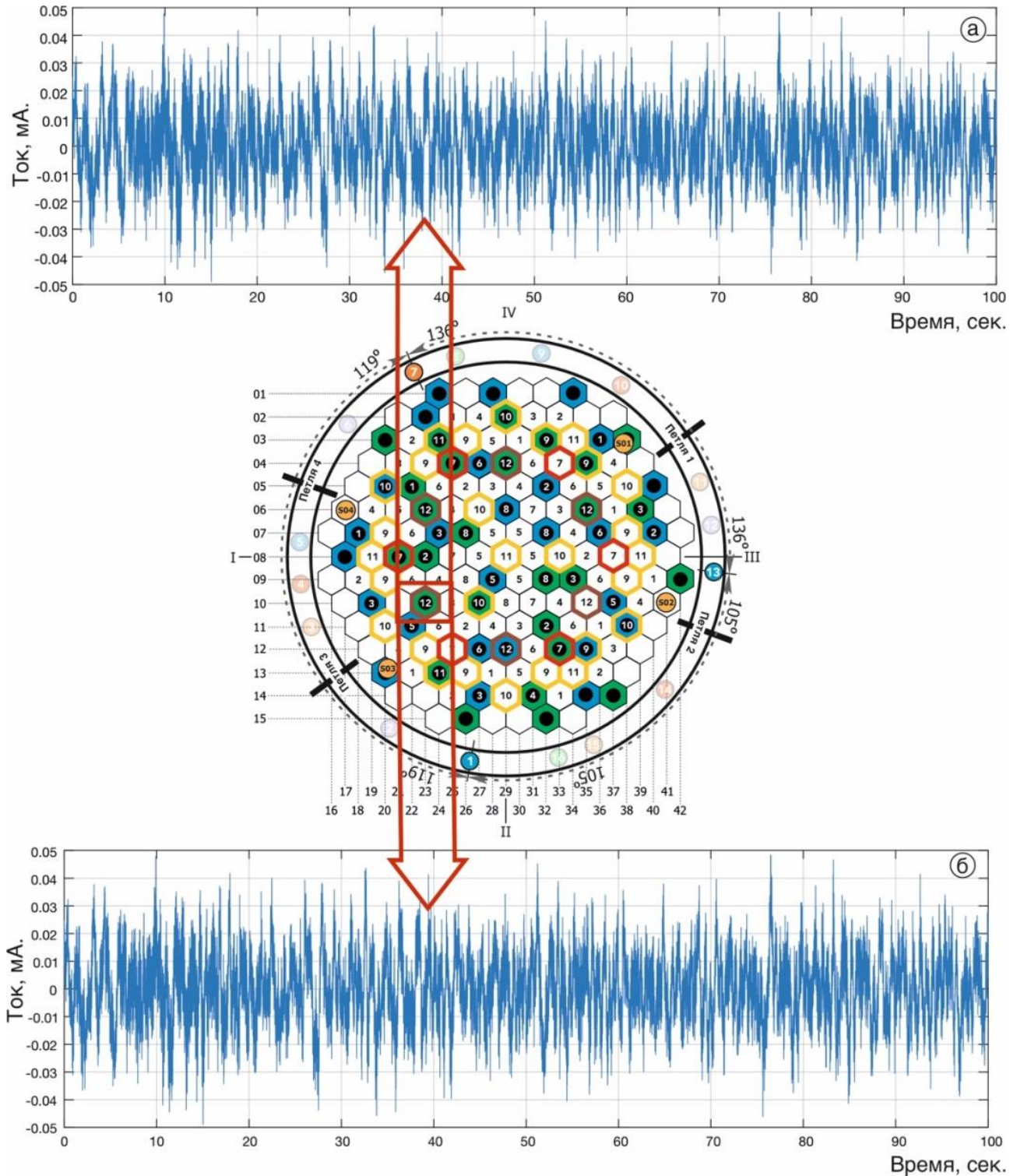
**Table 1.** Metrological and technical characteristics of the direct charge sensor as part of the SVRD (based on the User Manual<sup>1</sup>)

Наименование параметра		Значение параметра
Диаметр эмиттера, мм		0,5
Длина чувствительного элемента, мм		250
Начальная чувствительность потока нейтронов, $A \cdot m^2 \cdot c$	- полная	$3,00 \cdot 10^{-24}$
	- активационная	$2,83 \cdot 10^{-24}$
	- активационная, определяемая прямым образованием $Rh^{104}$	$2,60 \cdot 10^{-24}$
	- активационная, определяемая образованием $Rh^{104m}$	$0,23 \cdot 10^{-24}$
Изменение чувствительности за счет выгорания эмиттера, %/(A·c)		0,33
Чувствительность к мощности дозы гамма-излучения $Co^{60}$ , A·c/Гр		$2,0 \cdot 10^{-11}$

<sup>1</sup> Сборки внутриреакторных детекторов. Руководство по эксплуатации. ШПИС418260.002 РЭ – ИНКОР, 2013. – 83 с. – Режим доступа: по запросу авторам.

Флюктуации сигналов датчиков прямого заряда (ДПЗ) содержат богатую диагностическую информацию. ДПЗ чувствительны как к вибрационным явлениям (колебаниям

корпуса реактора, шахты внутрикорпусной (ШВК), тепловыделяющей сборки (ТВС)), так и теплогидравлическим явлениям (акустическая стоячая волна (АСВ), кипение



**Рисунок 1.** Временные реализации токовых сигналов ДПЗ для верха АЗ (а) и низа АЗ (б) для ТВС с координатами 10-23 при параметрах первого контура:  $T = \text{от } 320^{\circ}\text{C}$ ;  $P = 16,0 \text{ МПа}$   
**Figure 1.** Time responses of the in-reactor direct-charge detector current signals for the fuel assembly top (a) and the fuel assembly bottom (b) with fuel assembly coordinates 10–23, under the following primary circuit parameters:  $T = \text{from } 3200^{\circ}\text{C}$ ;  $P = 16.0 \text{ MPa}$

теплоносителя (ТН), транспорт температурных флуктуаций с входа реактора со скоростью ТН) более детальную информацию можно почерпнуть из авторских монографий [2,3]. Кроме того, в сигналах ДПЗ отображаются локальные нейтронные эффекты, например, такие, как высшие АСВ. В отличие от ДПЗ, ионизационные камеры (ИК) не чувствительны к ним, так как интегрирует пространственно-мелкие нейтронно-шумовые эффекты по всему объему активной зоны.

Существование в сигналах ДПЗ двух типов нейтронно-шумовых (НШ) источников (вибрационных и теплогидравлических), зачастую находящихся в одном и том же поддиапазоне частот, заставляет рассматривать их как конкурирующие источники при решении какой-либо одной конкретной задачи.

В данной работе авторами предпринята попытка оценить скорость теплоносителя через ТВС разного исполнения с использованием возможностей нейтронно-шумового метода.

### Обоснование представительности экспериментальных исследований

Важным этапом проведения экспериментальных исследований является подтверждение их представительности. Авторам неоднократно приходилось обоснованно и аргументировано доказывать обоснованность использования авторской методики измерения нейтронного шума, точность измерения частотных составляющих, оценки скорости теплоносителя и др.

Для непосредственной регистрации токовых сигналов ДПЗ были задействованы два переносных многоканальных анализатора LMS SCADAS Mobile (по 40 измерительных каналов каждый). Указанные аппаратные средства регулярно проходят метрологическую поверку и имеют действующие сертификаты утверждения типа измерений. К сожалению, в настоящее время, из-за санкционных ограничений оборудование данного класса запрещено к поставке в РФ, что резко ограничивает возможность использования данного приборного парка в России. Безусловно, реализованное авторами решение обладает рядом преимуществ: во-первых, возможность беспрепятственного подключения

любого типа первичного преобразователя, а во-вторых, еще одним безусловным достоинством, особенно в условиях санкционного давления на РФ, является гарантированная работа с компьютером на самых разных операционных системах. Связь с компьютером может осуществляться как напрямую (через Ethernet интерфейс), так и через беспроводный интерфейс (Wi-Fi или Bluetooth).

Разработанная авторами концепция, прежде всего, направлена на решение конкретных эксплуатационных задач и предполагает использование заложенных разработчиками систем унифицированных выходов необработанных аналоговых сигналов, что позволяет без значительных усилий собирать уникальные измерительные схемы. Гибкость решения позволяет производить регистрацию данных либо в кластерном исполнении, т.е. распределяя «измерительные кластеры» по оборудованию АЭС, объединяя «узлы» в единую сеть, либо достаточно компактно, но с существенным увеличением числа разнотипных каналов (более подробно про технические аспекты организации измерений в работах [4,5]).

Подводя итоги вышесказанного, оценим погрешность частоты при максимальной частоте дискретизации, реализованной в экспериментах ( $f_d = 1024$  Гц). Разрешение по частоте при использовании БПФ согласно [6,7] определяется формулой (1):

$$\delta f = \frac{1}{T}, \quad (1)$$

где  $\delta f$  – разрешение по частоте (условно расстояние между спектральными линиями);

$T$  – длина временной реализации, на которой и считается БПФ.

Таким образом, спектральное разрешение по частоте полностью определяется длиной временной реализации, а не частотой дискретизации АЦП. Однако частота дискретизации во временной области или по-другому время между двумя последовательными отсчетами определяет точность оценки частоты в частотной области. Исходя из формулы (1) определение частоты является косвенным результатом измерения временного интервала, для которого рассчитываются спектральные оценки. Поэтому приборная ошиб-

ка измерения частоты должна рассчитываться по формуле погрешности косвенного измерения временного интервала (2)<sup>2</sup>:

$$\Delta F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2 (\Delta x_1)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^2 (\Delta x_2)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_m}\right)^2 (\Delta x_m)^2} \quad (2)$$

преобразуя формулу (2) для нашего случая, получаем приборную ошибку определения частоты в частотной области, формула (3):

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial(1/T)}{\partial T}\right)^2 (\Delta T)^2} = \sqrt{\left(-\frac{1}{T^2}\right)^2 \Delta T^2} = \frac{\Delta T}{T^2} \quad (3)$$

Исходя из формулы (3) приборная ошибка при расчете частоты определяется точностью измерения временного интервала (частота дискретизации АЦП) и длиной временного интервала, для которого рассчитывается спектр.

В конечном итоге приборная ошибка в определении частоты при использовании переносного регистратора данных LMS SCADAS Mobile составляет  $\Delta f = 5 \cdot 10^{-8}$  Гц, что позволяет сделать важный вывод о том, что приборные средства, задействованные в экспериментах значимых погрешностей в конечный результат, не вносят.

Таким образом, в случае однократной оценки частоты по рассчитанному спектру абсолютная погрешность частоты определяется только погрешностью отсчета, формула (4)<sup>3</sup>[10]:

$$\Delta f_{\text{абс}} = \alpha \cdot f_{\text{от}}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – доверительная вероятность;

$f_{\text{от}}$  – погрешность отсчета частоты по линейной шкале, т.е. интервал, соответствующий случайной погрешности при использовании линейной шкалы.

Используя формулы (3) и (4), а также типовые условия для расчета спектральных характеристик:

- частоту дискретизации  $f_d = 1024$  Гц;
- временной интервал  $T = 100$  сек;
- погрешность отсчета частоты по линейной шкале  $0,005$  Гц;
- доверительную вероятность  $\alpha = 95\%$ , можно утверждать, что точность расчета частоты в представленных данных не хуже  $0,01$  Гц (3), с погрешностью не более  $\pm 0,005$  Гц (4).

### Краткие основы нейтронно-шумового метода контроля скорости теплоносителя

Шумовой метод вычисления поканальной скорости теплоносителя по флуктуациям внутризонного нейтронного потока широко применяется для чехловых ТВС ВВЭР-440 [8,9]. Этим методом производились измерения поканального расхода теплоносителя на всех Российских блоках с ВВЭР-440. По итогам шумовых измерений был уменьшен расход теплоносителя на блоке 2 Кольской АЭС в 2003 г. и блоке 2 АЭС Богунце в 2005 г. подрезанием колес ГЦН с целью уменьшения вибронгруженности ТВС. На блоке 4 Нововоронежской АЭС в 2006 г. расверливанием дроссельных шайб на входе в активную зону был увеличен расход теплоносителя с целью уменьшения гидравлического сопротивления и уменьшения перепада давления теплоносителя на активной зоне. Эффективность проведенных модернизаций трактов ГЦК всякий раз подтверждались шумовыми измерениями поканальной скорости теплоносителя.

Для вычисления скорости теплоносителя необходимо оценить время запаздывания сигналов двух ДПЗ частотным методом по локальным экстремумам их функции когерентности.

Рассмотрим данное утверждение более подробно. Зададим произвольные сигналы  $x(t)$  и  $y(t)$ , которые отличаются друг от

<sup>2</sup> Кравченко Н.С., Ревинская О.Г. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме: учебное пособие. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2017. – 121 с. Режим доступа: [https://e.lanbook.com/book/106764?category\\_pk=918&ysclid=mocibch858217300218](https://e.lanbook.com/book/106764?category_pk=918&ysclid=mocibch858217300218) (дата обращения: 31.03.2026); Афанасьев В.Н. Анализ временных рядов и прогнозирование : учебник. – Саратов: Ай Пи Ар Медиа; Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2020. 286 с. – Режим доступа: [https://elibr.osu.ru/bitstream/123456789/13336/1/133563\\_20201117.pdf?ysclid=mocikxf781757950109](https://elibr.osu.ru/bitstream/123456789/13336/1/133563_20201117.pdf?ysclid=mocikxf781757950109) (дата обращения: 31.03.2026).

<sup>3</sup> Афанасьев В.Н. Анализ временных рядов и прогнозирование : учебник. – Саратов: Ай Пи Ар Медиа; Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2020. 286 с. – Режим доступа: [https://elibr.osu.ru/bitstream/123456789/13336/1/133563\\_20201117.pdf?ysclid=mocikxf781757950109](https://elibr.osu.ru/bitstream/123456789/13336/1/133563_20201117.pdf?ysclid=mocikxf781757950109) (дата обращения: 31.03.2026).

друга только параметром запаздывания  $\tau_0$  – временем запаздывания сигнала  $x(t)$  по отношению к сигналу  $y(t)$ , выражения (5):

$$\begin{cases} x(t) = l(t) \\ y(t) = l(t + \tau_0) \end{cases} \quad (5)$$

где  $l(t)$  – произвольный процесс, зависящий от времени  $t$ .

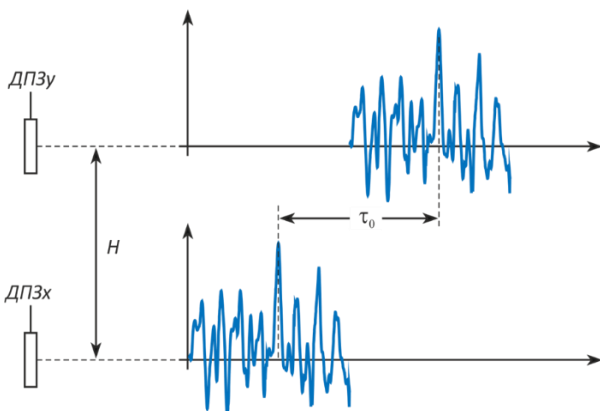
После Фурье-преобразования  $F[\dots]$  указанных процессов имеем выражения (6):

$$\begin{cases} F[x(t)] = F[l(t)] \\ F[y(t)] = e^{j\omega\tau_0} F[x(t)] \end{cases} \quad (6)$$

или в компактной записи выражение (7):

$$F_y = e^{j\omega\tau_0} F_x. \quad (7)$$

Будем называть такое выражение чистым запаздыванием или чистым транспортом. Единственное уравнение чистого транспорта (7) в частотной области соответствует системе из двух уравнений (5) во временной области. Физически его можно трактовать, как двухканальные измерения одного и того же процесса  $l(t)$  в разных точках из-за чего и возникает запаздывание  $\tau_0$ . Например, это может быть транспорт входных флуктуаций температуры теплоносителя –  $\delta T_{in}(t)$  вверх по активной зоне без искажений со скоростью  $v$  и временем запаздывания  $\tau_0 = \frac{H}{v}$  (рис. 2).



**Рисунок 2.** Транспорт входных флуктуаций температуры теплоносителя вверх по активной зоне  
**Figure 2.** Transport of input fluctuations in the heat carrier temperature up the active zone

Рассмотрим два датчика прямого заряда (ДПЗ), расположенные друг от друга на расстоянии  $H$ , регистрирующие сигналы, пропорциональные  $\delta T_{in}$ , выражения (8) и (9):

$$\begin{cases} x(t) = \delta T_{in}(t) \\ y(t) = \delta T_{in}(t + \tau_0) \end{cases} \quad (8)$$

где и  $\tau_0 = \frac{H}{v}$  и

$$F_y = e^{j\omega\frac{H}{v}} \delta T_{in}(\omega), \quad (9)$$

где  $\delta T_{in}(\omega) = F[\delta T_{in}(t)]$ .

Таким образом, спектр входных флуктуаций транспортируется от точки установки первого ДПЗ<sub>х</sub> до точки установки второго ДПЗ<sub>у</sub> и по запаздыванию  $\tau_0$  можно определить скорость ТН  $v = \frac{H}{\tau_0}$ .

В случае, если процесс  $l(t)$  – детерминированный и нет необходимости в усреднениях (в операции математического ожидания –  $M[\dots]$ ), то в целях оценивания параметра  $\tau_0$  следует оперировать Фурье-преобразованиями (спектрами), выражение (10):

$$F_y = e^{j\omega\tau_0} F_x, \quad (10)$$

или их мнимой и действительной частью, не переходя к спектральным плотностям, выражения (11):

$$\begin{cases} Im[F_y(\omega)] = \sin(\omega\tau_0) F_x(\omega), \\ Re[F_y(\omega)] = \cos(\omega\tau_0) F_x(\omega). \end{cases} \quad (11)$$

В данных выражениях синусоидальная функция с аргументом  $\omega\tau_0$  модулирует спектр  $F_x(\omega)$ , и по периодическим экстремумам, например, нулям на частотной оси, например, функции  $\sin(\omega\tau_0)$ , отыскивается параметр  $\tau_0 = \frac{k}{2f_0}$ ,  $k=1,2,3,\dots$

Введем понятия *sink*-структур и *sink*-частот, которые далее будут применяться в различных нейтронно-шумовых моделях. Последовательность, вообще говоря, бесконечную, периодических экстремумов – максимумов и минимумов – спектральных функций, возникающую из-за тригонометрических сомножителей или слагаемых типа

$\sin(\omega\tau_0)$ ,  $\cos(\omega\tau_0)$ ,  $\sin\frac{\omega\tau_0}{2}$ ,  $\cos\frac{\omega\tau_0}{2}$ ,  $\frac{\sin(\omega\tau_0)}{\omega\tau_0}$   
и т.д. будем называть *sink*-структурой, а собственно частоты экстремумов *sink*-структуры будем называть *sink*-частотами. Частоты, на которых достигаются локальные минимумы спектральной функции, будем обозначать  $f_{sink}^{min}$ , например, выражение (12):

$$f_{sink}^{min} = \frac{1}{2\tau_0}, \frac{3}{2\tau_0}, \frac{5}{2\tau_0}, \dots, \frac{n-1/2}{\tau_0}, \dots \quad (12)$$

Приведенный выше пример достаточно условен и дает самое общее представление о расчете *sink*-частот. В случае наличие глобального нейтронного шума, и некоррелированных шумов по каждому измерительному каналу расчет *sink*-частот целесообразно осуществлять не по спектральным характеристикам, а по функции когерентности пар ДПЗ (более подробная информация в источнике [10]).

Для ВВЭР-1200 характерна особая гидродинамикой потока теплоносителя в активной зоне. Если для ВВЭР-440 чехлы ТВС сохраняют плотностные структуры теплоносителя, образовавшиеся на входе в активную зону, то в активной зоне ВВЭР-1200 (ВВЭР-1000) происходит его поперечное перемешивание. Плотностные пространственные структуры теплоносителя на входе в активную зону «размываются» по мере их движения вверх из-за процессов генерирования энергии в активной зоне, возможных процессов парообразования и поперечных перетечек. Поэтому среди всевозможных пар сигналов «ДПЗ-ДПЗ» одного СВРД (21 штука) пара «ДПЗ1-ДПЗ7» обладает наименьшей когерентностью. В этом есть свои преимущества и недостатки. Во-первых, высокая когерентность сигналов близких пар ДПЗ может быть обусловлена глобальным компонентом, который является маскирующим для выявления эффекта переноса плотностных неоднородностей. Во-вторых, на входе в активную зону, где отсутствуют эффекты парообразования в теплоносителе, задается эталон однофазной плотностной структуры и по нему отыскиваются взаимосвязи на выходе активной зоны. Тогда, если будет обнаружен, так называемый, транс-

портный эффект (эффект переноса), то он будет обусловлен перемещением только жидкой (а не парообразной) фазы теплоносителя вверх по активной зоне.

### Особенности конструкции тепловыделяющей сборки V-поколения (ТВС-5)

Тепловыделяющая сборка ТВС-5 без крепления тепловыделяющих элементов в нижней решетке разработана для обеспечения безлаковой дистанционной сборки высокофонового уран-плутониевого топлива на заводе-изготовителе и обеспечения возможности замены дефектных твэлов при выполнении ремонта в условиях АЭС. Конструкция ТВС-5 разработана на основе материалов технического проекта ТВС-2М и ТВС-2006, имеющих конструктивные и технологические особенности (цанговое крепление твэла в нижней решетке и сборка пучка с лаковым покрытием твэлов), которые делают их малопригодными для дистанционного изготовления и имеющие ограниченную ремонтпригодность. Вопросы необходимости разработки нового топлива частично раскрыты в работе [10].

При проектировании ТВС-5 для обеспечения ее дистанционной сборки и ремонтпригодности приняты решения:

- об использовании в конструкции твэлов без крепления в нижней решетке;
- об изменении конструкции твэлов и нижней решетки;
- об оптимизации конструкции дистанционирующих решеток, их расположения и количества.

Разработка новой конструкции ТВС-5 на основе ТВС-2М обусловлена перспективой использования в будущем, более совершенного уран-плутониевого топлива. Цель создания ТВС-5 – минимизировать радиационное воздействие на персонал завода-изготовителя во время производственных и контрольных операций с топливными сборками.

Кроме того, новая конструкция ТВС призвана предотвратить образование жидких радиоактивных отходов в процессе производства. Это достигается за счет исключения технологических операций по лакированию и смазыванию тепловыделяющих элементов

(ТВЭлов), а также последующей промывки собранной ТВС от остатков лака и смазки.

Исходя из этого, ключевым требованием к конструкции ТВС-5 является возможность дистанционной сборки на заводе-изготовителе с минимальным количеством дефектов оболочек ТВЭлов, которые могут возникнуть в процессе сборки. При этом сборка должна осуществляться без использования лаков и смазывающих составов.

Соблюдение этих требований в новой конструкции тепловыделяющей сборки (ТВС) позволит осуществлять ее дистанционный монтаж, демонтаж и ремонт как на заводе-производителе, так и на атомной электростанции с использованием стэнда для проверки и ремонта ТВС. Разрабатываемая конструкция ТВС должна быть максимально унифицирована в рамках технологии ВВЭР. Это позволит использовать ее с минимальными изменениями, учитывающими особенности конструкций оборудования различных типов реакторов ВВЭР, на всех современных мощных реакторных установках (РУ) ВВЭР – ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 и ВВЭР-1300 (ВВЭР ТОИ).

ТВС-5 обладает жесткой конструкцией, что исключает возможность деформации кассеты в процессе эксплуатации. Это достигается благодаря тому, что к 18 направляющим каналам (НК) привариваются дистанционирующие решетки (ДР). В нижней части сборки установлена антивибрационная решетка, которая снижает вибрационные нагрузки на элементы ТВС в зоне хвостовика.

Для достижения совместимости ТВС-5 с ТВС-2006, обе ТВС имеют полностью аналогичную конструкцию, в том числе целью унификации с другими ТВС ВВЭР в конструкции ТВС-5 применена головка ТВС-2006.

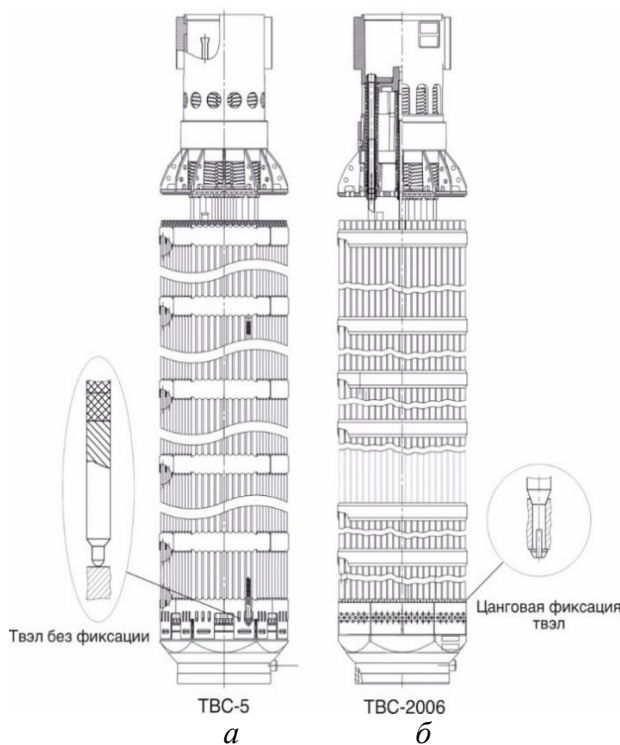
Различия в конструкции заключается:

- в новой дистанцирующей решетке, обеспечивающая установку ТВЭлов в каркас со сниженным усилием при том же натяге в паре ячейка-ТВЭл относительно прототипа;
- в использовании цангового крепления ТВЭла и ТВЭга в нижней решетке заменено на крепление нижней заглушки в АВР с опорой ТВЭла и ТВЭга на нижнюю решетку (рис. 3а);

- изменении шага дистанционирующих решеток 12, 13, 14 (подробнее – в пояснительной записке «ТВС-5. ТВС для дистанционного изготовления»<sup>4</sup>;

- увеличении длины ТВЭл/ТВЭг на 27 мм (4058 мм вместо 4031 мм)<sup>5</sup>.

Расположение ТВС-5 в активной зоне седьмой топливной загрузки представлено на рисунке 4 (ТВС-5 выделены красным цветом). Из представленных данных следует, что под постоянным контролем находятся только 2 сборки (07-18 и 03-36) из 3 возможных. Сборка установленное в ячейку №13 (координаты 14-33) не оснащена измерительными каналами ДПЗ. Поэтому дальнейший анализ состояния ТВС-5 по нейтронно-шумовым сигналам будет произведен только для двух ТВС-5, оснащенных каналами ДПЗ.



**Рисунок 3.** Конструктивные особенности:

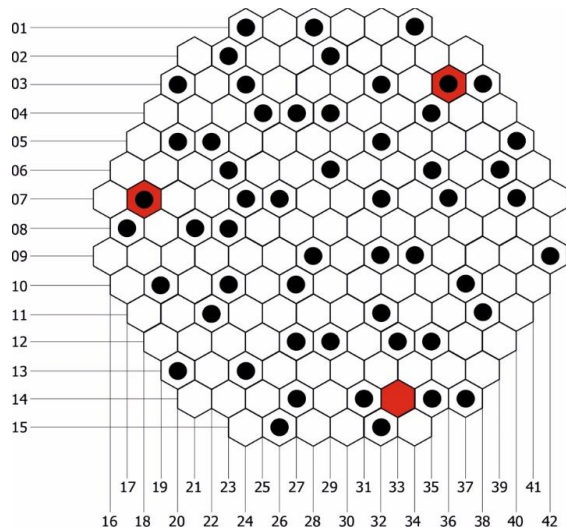
а – ТВС-5; б – ТВС-2006

**Figure 3.** Design features:

а – TVS-5; б – TVS-2006

<sup>4</sup> ТВС-5. ТВС для дистанционного изготовления. Пояснительная записка. 545 ПЗ. Подольск, АО ОКБ «Гидропресс», 2023. – Режим доступа: по запросу авторам;

<sup>5</sup> Предварительный отчет по обоснованию безопасности. Глава 4. – ФГУП «Атомэнергопроект», 2007. – Режим доступа: по запросу авторам.



**Рисунок 4.** Картограмма седьмой топливной загрузки блока №1 НВАЭС-2: ТВС-5 выделены красным цветом, ТВС со сборками ДПЗ отмечены черным кругом

**Figure 4.** Map of the seventh fuel load of Unit 1 at NVNPP-2: TVS-5 is highlighted in red, and TVS with DPP assemblies are marked with a black circle

### Скорость теплоносителя в ТВС и в ТВС-5

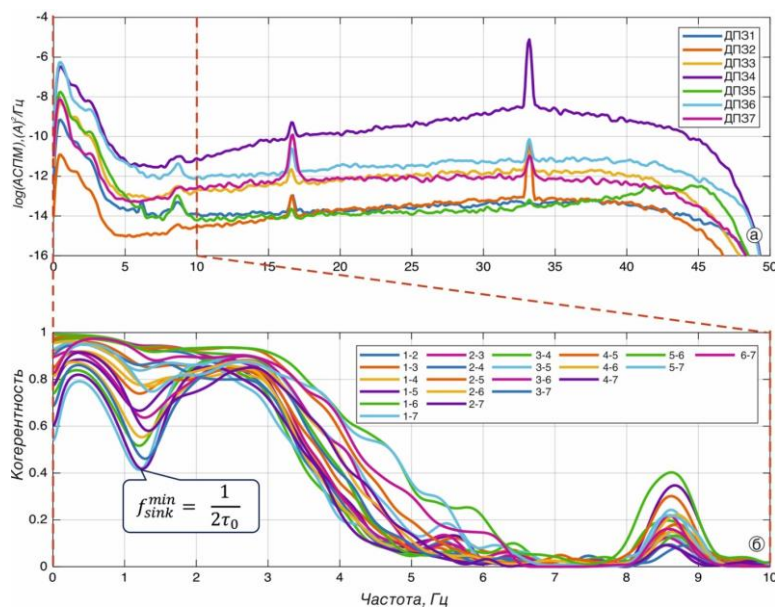
Семь сигналов одного СВРД дают 21 комбинацию функций когерентности. Это так называемый полный перебор пар сигналов. В идеальном цилиндрическом реакторе с неизменными теплофизическими параметрами теплоносителя функции когерентности, построенные по признаку равенства рассто-

ятий между двумя ДПЗ, должны быть тождественными между собой. Реальный теплоноситель, в котором монотонно уменьшается его плотность с увеличением аксиальной координаты, а также изменяется его агрегатное состояние, порождает разные функции когерентности внутри одного семейства. Покажем это на примере ТВС 04-35 при измерении 27.08.2025 (рис. 5).

У всех функций когерентности наблюдаются коллективные свойства:

- резонанс АСВ1к вблизи частоты 8.75 Гц;
- локальный минимум в поддиапазоне частот [1.2–1.6] Гц;
- абсолютный минимум в поддиапазоне частот [7.48–7.52] Гц.

При неизменных условиях транспорта нейтронно-шумовых неоднородностей по вертикали АЗ, представленные на рисунке 5 семейства когерентностей должны иметь вид так называемых «жгутов». То есть кривые должны совпадать друг с другом в пределах точности их оценивания, чего на практике не наблюдается. А наблюдается общая тенденция для всех СВРД, состоящая в том, что по мере движения вверх, когерентность внутри одного семейства нарастает.



**Рисунок 5.** Автоспектральная плотность мощности датчиков прямого заряда для ТВС 04-35 для полосы частот 0 – 50 Гц (а), набор функций когерентности, рассчитанный для всевозможных пар датчиков прямого заряда сборки 04-35 для полосы частот 0 – 10 Гц (б), дата 27.08.2025

**Figure 5.** Autospectral power density of direct charge sensors for TVS 04-35 for the frequency band 0 – 50 Hz (a), set of coherence functions calculated for all possible pairs of direct charge sensors of the 04-35 assembly for the frequency band 0 – 10 Hz (b), 27.08.2025

Абсолютный минимум достигается на значениях функции когерентности, весьма близких к нулю. Если одним из сигналов функции когерентности является сигнал нижних ДПЗ (ДПЗ1 или ДПЗ2), то наблюдается *sink*-частота в пределах [4.15–4.65] Гц. Перечисленные выше два поддиапазона минимумов принадлежат одной и той же глобальной *sink*-структуре, так как положение минимума в поддиапазоне [7.48–7.52] практически неизменно для всех пар ДПЗ, а на местоположение локального минимума в поддиапазоне [4.15–4.65] Гц воздействует соседний слева глобальный компонент. Данная *sink*-структура присутствует во всех семействах функций когерентности с шагом более трех: (1–5, 2–6, 3–7), (1–6, 2–7), (1–7), что подтверждает ее глобальность. В других семействах на нее оказывают воздействие локальные источники НШ. Когерентности удаленных ДПЗ, принадлежащие разным семействам (1–7), (2–7), (2–6), практически совпадают друг с другом, что свидетельствует о тождественном теплофизическом состоянии ТН в горизонте ДПЗ6 и в горизонте ДПЗ7, а также горизонты ДПЗ1 и ДПЗ2 имеют свои тождественные состояния ТН.

Параметры этой глобальной *sink*-структуры необходимо связывать с общеконтурными параметрами, например с общеконтурным расходом ТН. Частоты минимума из широкого поддиапазона [4.15–4.65] Гц являются смещенными, а вот поддиапазон [7.48–7.52] весьма узкий и более всего подходит для оценки общеконтурного расхода ТН. Погрешность такой оценки будет тем меньше, чем ближе к нулю в точке минимума функция когерентности ДПЗ-ДПЗ одного СВРД. Чаще всего абсолютный минимум достигается на паре удаленных ДПЗ1-ДПЗ7.

С увеличением расстояния между двумя ДПЗ не наблюдается кратного увеличения числа локальных экстремумов, как это наблюдается для когерентностей ДПЗ в ВВЭР-440. Рассматриваемые когерентности для ВВЭР-1200 качественно близки к соответствующим когерентностям ВВЭР-1000, но различаются частотами локальных минимумов. Главная причина такого различия когерентностей состоит в отли-

чий объема паровой фазы теплоносителя в ВВЭР-1200 и ВВЭР-1000. Отсутствие кратных *sink*-структур как в ВВЭР-1000, так и в ВВЭР-1200 обусловлено наличием поперечных перетечек теплоносителя.

Таким образом, из запаздывания сигнала ДПЗ7 по отношению к сигналу ДПЗ1 может быть вычислена поканальная скорость (расход) теплоносителя по жидкой фазе. Однако, для ВВЭР-1200 ввиду увеличения длины ТВС по сравнению с ТВС ВВЭР-1000 наилучшими парами для расчета скорости (расхода) теплоносителя являются пары ДПЗ1-ДПЗ6 и ДПЗ2-ДПЗ7. Значения  $f_{sink}^{min}$  для случая, представленного на рисунке 5, сведены в таблицу 2.

**Таблица 2.** Значение минимальной частоты *sink*-структур, выделенных в функциях когерентности в сигналах ДПЗ для ТВС 04-35 (27.08.2025)<sup>6</sup>

**Table 2.** Value of minimum frequency of sink structures allocated in coherence functions in DCS signals for FA 04-35 (27.08.2025)

№ ДПЗ	Частота (f), Гц						Расстояние (l), м
	2	3	4	5	6	7	
1	-	1,36	1,24	1,20	1,20	1,20	
2		1,33	1,22	1,21	1,24	1,25	3,198
3			1,24	1,22	1,28	1,29	2,655
4				1,32	1,34	1,33	2,132
5					1,42	1,38	1,599
6						1,45	1,066
							0,533

Из данных таблицы 2 видно, что значение  $f_{sink}^{min}$  для пар ДПЗ1-ДПЗ6 и ДПЗ2-ДПЗ7 (расстояние между центрами указанных пар преобразователей составляет 2,655 м), в одном случае составляет величину 1,20 Гц, а в другом – 1,25 Гц. Таким образом, имеется «верхняя» и «нижняя» оценка скорости теплоносителя, усреднив которые можно получить величину близкую к истинной скорости.

Скорость теплоносителя определяется как:

$$v = 2lf, \quad (13)$$

где  $v$  – скорость теплоносителя, м/с;

<sup>6</sup> Обоснование точности расчета частоты изложено в работе [5]

$l$  – расстояние между центрами пары ДПЗ, м;

$f$  – частота  $f_{sink}^{min}$ , Гц.

Используя формулу (9), получаем соответствующие оценки скорости 6,37 м/с и 6,64 м/с или среднюю скорость – 6,51 м/с.

Для обоснования точности оценки скорости необходимо рассчитать ошибку. Однако бездумное использование предлагаемых методик оценки может привести к неверному результату. Действительно, согласно источникам<sup>7</sup>, ошибка оценки скорости теплоносителя, рассчитанной по формуле (13), составит:

$$\Delta v = \sqrt{2f(\Delta l)^2 + 2l(\Delta f)^2}, \quad (14)$$

где  $\Delta v$  – ошибка в определении скорости теплоносителя, м/с;

$\Delta l$  – ошибка в определении расстояния между центрами ДПЗ, м;

$\Delta f$  – ошибка в определении частоты, Гц.

Если использовать «паспортные» значения  $\Delta l = 0,01$  м (точность установки ДПЗ в сборке СВРД) и  $\Delta f = 0,01$  Гц, то используя формулу (10) можно говорить об ошибке в определении скорости на уровне  $\Delta v \sim 0,01$  м/с, что явно не соответствует возможностям описываемого метода. Следует учитывать, что ДПЗ представляет собой протяженный элемент (длина 0,25 м), а не «материальную точку», поэтому регистрация флуктуаций теплоносителя осуществляется по всей его длине. Поэтому, целесообразно оценивать ошибку в определении расстояния в половину длины ДПЗ, т.к. единичная флуктуация может оказаться либо ниже центра ДПЗ, либо выше, что и составляет неопределенность в определении длины равной 0,125 м на один ДПЗ (на пару 0,25 м). Таким образом, введя допущение,

что  $\Delta l = 0,25$  м, можем оценить величину ошибки как  $\Delta v = 0,35$  м/с для частоты  $f = 1$  Гц и  $\Delta v = 0,42$  м/с для частоты  $f = 1,4$  Гц (данные из табл. 1). Таким образом, ошибка определения скорости теплоносителя нейтронно-шумовым методом не превышает  $\Delta v = 0,4$  м/с, что дает возможность оценки скорости теплоносителя в ТВС 04-35 на 27.08.2025 величиной  $v = 6,5 \pm 0,4$  м/с.

По изложенному выше алгоритму был произведен расчет скорости теплоносителя для всех задействованных в экспериментах ТВС (данные сведены в табл. 3). К сожалению, из-за ошибки оператора при регистрации данных 24.06.2025 и 23.07.2025 не были выключены низкочастотные фильтры, что делает невозможным использование нейтронно-шумового метода для оценки скорости теплоносителя. Поэтому в таблице 3 только 4 оценки скорости для каждой ТВС из 6 зарегистрированных наборов данных.

**Таблица 3.** Нейтронно-шумовая оценка скорости<sup>8</sup> теплоносителя в ТВС за разные периоды времени  
**Table 3.** Neutron noise estimation of the coolant flow rate[1] in a fuel assembly over different time periods

Координаты ТВС	Скорость теплоносителя, м/с			
	27.08.2025	24.09.2025	14.11.2025	21.01.2026
03-36 (ТВС-5)	6,3	6,2	5,9	6,3
02-29	6,2	6,3	6,4	5,9
04-35	6,5	5,8	6,1	6,2
07-18 (ТВС-5)	6,2	6,2	6,1	6,5
08-21	7,3	7,2	6,9	6,5

Кратко подводя итоги проделанной работы по определению расходов теплоносителя через штатные ТВС и ТВС-5 можно с уверенностью сказать, что ТВС-5 не выделяется по указанному параметру относительно ТВС-2006. Так, например, расположенные рядом ТВС-5 (03-36) и штатная ТВС (04-35) имеют одинаковый расход (с точностью  $\Delta v = 0,4$  м/с).

<sup>7</sup> Пономарев В.Б., Лошкарёв А.Б. Математическая обработка результатов инженерного эксперимента: учебное пособие. – Екатеринбург: Издательство Уральского федерального университета, 2019. – 104 с. Режим доступа: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/78092?ysclid=mocj463ugi111837766> (дата обращения: 31.03.2026); Аксенова Е.Н., Гасников Н.К., Калашников Н.П. Методы оценки погрешностей результатов прямых и косвенных измерений в лабораториях физического практикума: учебно-методическое пособие. М.: МИФИ, 2009. 24 с. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/414791/> (дата обращения: 31.03.2026).

<sup>8</sup> Ошибка в определении скорости теплоносителя не превышает величину  $\Delta v = 0,4$  м/с для всех значений в таблице

## Выводы

Мониторинг поканальных расходов позволяет выявить ТВС со стабильно низким и стабильно высоким расходом ТН. Фактор стабильности может быть обусловлен конкретной загрузкой активной зоны, и тогда стабильность должна сохраняться в течение одной топливной кампании. Долгосрочная стабильность связана с неизменными конструктивными особенностями РУ с ВВЭР-1200, а именно, с диаметрами труб в БЗТ над данной ТВС, близостью выгородки активной зоны, наличием СВРД и каналов термоконтроля в данной ТВС. Переменная конструктивная особенность связана с движением органов регулирования (ОР СУЗ) в направляющих каналах (НК) ТВС, которое незначительно, но изменяет гидравлическое сопротивление ТВС в целом.

Энерговыделение, как функция пространственных координат активной зоны, также является фактором нестабильности расхода

теплоносителя. Энерговыделение зависит не только от срока эксплуатации ТВС, ее обогащения, от положения ОР СУЗ и концентрации борной кислоты, но и от «медленных» процессов, связанных с выгоранием топлива и выгорающих поглотителей (подробнее источники [12,13]). Эти процессы, вообще говоря, имеют индивидуальные для каждой ТВС скорости. То есть, шесть ТВС из ближайшего окружения данной ТВС, в первом приближении, также влияют на поканальный расход теплоносителя.

К фактору нестабильности поканального расхода через ТВС следует отнести изменение поля скоростей на входе в активную зону из-за подключения/отключения дополнительных контуров циркуляции теплоносителя. Также изменяется поле плотностей теплоносителя на входе в активную зону при включении/отключении контуров борного регулирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Мительман М.Г., Розенблум Н.Д. Зарядовые детекторы ионизирующих излучений. Москва: Энергоиздат, 1982. 77 с. Режим доступа: [https://rusneb.ru/catalog/000200\\_000018\\_rc\\_1108163/](https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_1108163/) (дата обращения: 31.03.2026).  
Mitelman M.G., Rosenblum N.D. Charge detectors of ionizing radiation. Moscow. Energoizdat, 1982. 77 p. (In Russ.). Available at: [https://rusneb.ru/catalog/000200\\_000018\\_rc\\_1108163/](https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_1108163/) (accessed: 31.03.2026).
2. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Виброакустика в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200. Москва: Наука, 2018. 469 с. Режим доступа: [https://elib.biblioatom.ru/text/arkadov\\_vibroakustika\\_2018/p0/](https://elib.biblioatom.ru/text/arkadov_vibroakustika_2018/p0/) (дата обращения: 31.03.2026).  
Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Vibroacoustics in applications to the VVER-1200 reactor plant. Moscow: Nauka, 2018. 469 p. (In Russ.). Available at: [https://elib.biblioatom.ru/text/arkadov\\_vibroakustika\\_2018/p0/](https://elib.biblioatom.ru/text/arkadov_vibroakustika_2018/p0/) (accessed: 31.03.2026).
3. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Шумовой мониторинг в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200. Монография. Ч.1. Москва: Наука, 2021. 222 с. Режим доступа: [https://elib.biblioatom.ru/text/arkadov\\_shumovoy-monitoring\\_2021/p0/](https://elib.biblioatom.ru/text/arkadov_shumovoy-monitoring_2021/p0/) (дата обращения: 31.03.2026).  
Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Noise monitoring in applications to the VVER-1200 reactor plant. Monograph. Moscow: Nauka, 2021. Part 1. 222 p. (In Russ.). Available at: [https://elib.biblioatom.ru/text/arkadov\\_shumovoy-monitoring\\_2021/p0/](https://elib.biblioatom.ru/text/arkadov_shumovoy-monitoring_2021/p0/) (accessed: 31.03.2026).
4. Павелко В.И., Слепов М.Т., Хайретдинов В.У. Опыт проведения комплексных измерений с использованием разнородных систем на различных этапах пуска энергоблока ВВЭР-1200. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2016;4:44-54. Режим доступа: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/articles/2016/04/05.pdf> (дата обращения: 31.03.2026).  
Pavelko V.I., Slepov M.T., Khayretdinov V.U. The experience of conducting complex measurements using heterogeneous systems at various stages of the VVER-1200 power unit start-up. *Izvestia of Higher Educational institutions. Nuclear power engineering*. 2016;4:44-54. (In Russ.). Available at: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/articles/2016/04/05.pdf> (accessed: 31.03.2026).
5. Слепов М.Т. Методология комплексного шумового контроля оборудования ВВЭР-1200. Диссертация доктора технических наук (спец. 2.4.9). Москва, 2025. 307 с. Режим доступа: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_013256025/?ysclid=mochzmcmr0615125711](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_013256025/?ysclid=mochzmcmr0615125711) (дата обращения: 30.03.2026).

Slepov M.T. Methodology of integrated noise control of VVER-1200 equipment. Dissertation of the Doctor of Technical Sciences (spec. 2.4.9). Moscow, 2025. 307 p. (In Russ.). Available at: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_013256025/?ysclid=mochzmcmr0615125711](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_013256025/?ysclid=mochzmcmr0615125711) (accessed: 30.03.2026).

6. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2011. 756 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004829046?ysclid=moci2cxrwc874923697> (дата обращения: 31.03.2026).

Sergienko A.B. Digital signal processing: 3rd edition. Saint Petersburg: BHV-Petersburg, 2011. 756с., ISBN 978-5-9775-0606-9. (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004829046?ysclid=moci2cxrwc874923697> (accessed: 31.03.2026).

7. Залманзон Л.А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и применение в управлении, связи и других областях. Москва: Наука, 1989. 496 с. Режим доступа: [https://rusneb.ru/catalog/000200\\_000018\\_rc\\_401958/?ysclid=moci4m3286747370887](https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_401958/?ysclid=moci4m3286747370887) (дата обращения: 31.03.2026).

Zalmanzon L.A. Fourier, Walsh, Haar transformations and their application in management, communications and other fields. Moscow: Nauka, 1989. 496 p. (In Russ.). Available at: [https://rusneb.ru/catalog/000200\\_000018\\_rc\\_401958/?ysclid=moci4m3286747370887](https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_401958/?ysclid=moci4m3286747370887) (accessed: 31.03.2026).

8. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Усанов А.И. Виброшумовая диагностика ВВЭР. Москва: Энергоатомиздат, 2004. 344 с. Режим доступа: <https://reallib.org/reader?file=637017&ysclid=mocinpxjux170772173> (дата обращения: 30.03.2026).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Usanov A.I. Vibration-noise diagnostics of VVER. Moscow: Energoatomizdat, 2004. 344 p. (In Russ.). Available at: <https://reallib.org/reader?file=637017&ysclid=mocinpxjux170772173> (accessed: 30.03.2026).

9. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Финкель Б.М. Системы диагностирования ВВЭР. Москва: Наука, 2019. 398 с. Режим доступа: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_010027097/?ysclid=mocirzj7at241126156](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_010027097/?ysclid=mocirzj7at241126156) (дата обращения: 30.03.2026).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Finkel B.M. VVER diagnostic systems. Moscow: Nauka, 2019. 398 с. ISBN 978-5-02-040184-6. (In Russ.). Available at: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_010027097/?ysclid=mocirzj7at241126156](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_010027097/?ysclid=mocirzj7at241126156) (accessed: 30.03.2026).

10. Павелко В.И. Новые спектральные методы оценки времени запаздывания в реакторно-шумовых исследованиях. *Атомная энергия*. 1987;63(4):266-288. Режим доступа: [https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya\\_t63-4\\_1987/p0/](https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t63-4_1987/p0/) (дата обращения: 30.03.2026).

Pavelko V.I. New spectral methods for estimating the delay time in reactor noise studies. *Nuclear energy*. 1987;63(4):266-288. (In Russ.). Available at: [https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya\\_t63-4\\_1987/p0/](https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t63-4_1987/p0/) (accessed: 30.03.2026).

11. Аркадов Г.В., Слепов М.Т. Нейтронно-шумовой анализ вибрационного состояния тепловыделяющих сборок пятого поколения. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(4):64-77. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-07>.

Arkadov G.V., Slepov M.T. Neutron noise analysis of the vibration state of fifth-generation fuel assemblies. *Global nuclear safety*. 2025;15(4):64-77. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-07>.

12. Поваров В.П., Голубев Е.И., Жук М.М. Физика реактора ВВЭР-1200 и эксплуатационные вопросы: научно-практическое пособие. Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская атомная станция», 2025; Белгород: «КОНСТАНТА», 2025. 332 с. ISBN 978-5-907903-23-4. Режим доступа: <https://cat.gpntb.ru/index.php?id=EC/ShowFull&bid=175cb837cf043602b5c4caa752274887&irbDb=ESVODT> (дата обращения: 31.03.2026).

Povarov V.P., Golubev E.I., Zhuk M.M. Physics of the VVER-1200 reactor and operational issues: a scientific and practical guide. Branch of JSC Concern Rosenergoatom Novovoronezh Nuclear Power Plant, 2025; Belgorod: CONSTANT, 2025. 332 p. ISBN 978-5-907903-23-4. (In Russ.). Available at: <https://cat.gpntb.ru/index.php?id=EC/ShowFull&bid=175cb837cf043602b5c4caa752274887&irbDb=ESVODT> (accessed: 31.03.2026).

13. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Анализ шумовой составляющей сигналов датчиков прямого заряда на маневренных режимах ВВЭР. Труды НГТУ им. Р.Е. Алексея. 2023;4(143):51-61. Режим доступа: <https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2023/04/051-061.pdf?ysclid=mocjpwawap650957813> (дата обращения: 31.03.2026).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Analysis of the noise component of direct charge sensor signals in maneuverable VVER modes. *Proceedings of the NSTU named after R.E. Alekseev*. 2023;4(143):51-61. (In Russ.). Available at: <https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2023/04/051-061.pdf?ysclid=mocjpwawap650957813> (accessed: 31.03.2026).

## ВКЛАД АВТОРОВ:

**Аркадов Г.В.** – обработка результатов исследования, разработка алгоритмов обработки, проведение расчетов;

**Слепов М.Т.** – формулировка идеи и целей исследования, проведение исследований на АЭС, визуализация экспериментальных данных, разработка направлений исследований, выявление закономерностей.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Геннадий Викторович Аркадов**, кандидат технических наук, генеральный директор, Некоммерческое партнерство содействия развитию системной инженерии «Райз», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0005-4464-9973>

e-mail: arkgen47@gmail.com

**Михаил Тимофеевич Слепов**, доктор технических наук, начальник отдела филиала АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС, г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-5563-0526>

e-mail: tymofeech@yandex.ru

## AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Arkadov G.V.** – processing of research results, development of processing algorithms, identification of patterns, carrying out calculations;

**Slepov M.T.** – formulation of the idea and objectives of the research, conducting research at nuclear power plants, visualization of experimental data, development of research directions.

## FUNDING:

The authors declare no external funding.

## CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare that there is no conflict of interest.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Gennady V. Arkadov**, Cand. Sci. (Eng.), Director General, Non-Profit Partnership for the Promotion of System Engineering «Rise», Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0005-4464-9973>

e-mail: arkgen47@gmail.com

**Mikhail T. Slepov**, Dr. Sci. (Engin.), Head of the Department of Novovoronezh NPP the Branch of JSC Concern Rosenergoatom, Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-5563-0526>

e-mail: tymofeech@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 04.04.2026

После доработки / Revision 28.05.2026

Принята к публикации / Accepted 02.06.2026

**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

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-09>

УДК 338.45:621.039

EDN PIPLTA

Оригинальная статья / Original paper



**Репутационный потенциал атомных моногородов как стратегический  
ресурс технологического лидерства**

**Н.Ю. Лесных, А.А. Созинова ✉, Н.К. Савельева, М.В. Макарова**

*ФГБОУ ВО «ВятГУ», г. Киров, Кировская обл., Российская Федерация*

✉ [aa\\_sozinova@vyatsu.ru](mailto:aa_sozinova@vyatsu.ru)

**Аннотация.** Современная парадигма развития Российской Федерации отличается повышенным вниманием к обеспечению технологического лидерства и суверенитета государства. В этой связи возрастает значение высокотехнологических моногородов, таких как города присутствия Госкорпорации «Росатом». При своем уникальном ресурсном потенциале эти территории сталкиваются с оттоком квалифицированных кадров и имиджевыми ограничениями из-за закрытого статуса, что ставит перед исследователями задачу по поиску инструментов стратегического управления, учитывающих необходимость качественного роста их репутации. Цель статьи – разработка и апробация методического подхода к стратегическому анализу репутационного потенциала высокотехнологичных моногородов и формированию на его основе дорожной карты развития исследуемых территорий с целью обеспечения и поддержания технологического лидерства. Методология исследования основана на трехэтапном алгоритме: на первом этапе были проведены PESTEL-анализ, анализ пяти конкурентных сил Портера и ключевых факторов успеха, на втором – динамический SWOT-анализ по методике П.А. Михненко с экспертной оценкой скорости влияния факторов внешней и внутренней среды, на третьем – разработана приоритизированная дорожная карта развития репутационного потенциала атомных моногородов. Результаты: выявлены ключевые вызовы (конкуренция за человеческий капитал, требования к качеству среды, ограничения ЗАТО) и возможности (господдержка, новые технологии); обосновано, что рыночная власть потребителей и поставщиков формирует «контур репутационной уязвимости»; получены взвешенные динамические оценки стратегических альтернатив развития атомных моногородов; а также разработана дорожная карта развития репутационного потенциала атомных моногородов на период до 2030 года, включающая девять направлений, сгруппированных по трем приоритетам (срочная, среднесрочная и долгосрочная реализация). Предложенный подход может быть использован при актуализации стратегий социально-экономического развития городов присутствия Госкорпорации «Росатом» и формировании единой политики управления их репутацией.

**Ключевые слова:** репутационный потенциал, моногорода, атомные города, Росатом, территориальный бренд, стратегическое планирование, технологическое лидерство, SWOT-анализ, PESTEL-анализ, дорожная карта, человеческий капитал

**Для цитирования:** Лесных Н.Ю., Созинова А.А., Савельева Н.К., Макарова М.В. Репутационный потенциал атомных моногородов как стратегический ресурс технологического лидерства. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(2):91-105. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-09>

**For citation:** Lesnykh N.Yu., Sozinova A.A., Savelyeva N.K., Makarova M.V. The reputational potential of nuclear single-industry towns as a strategic resource for technological leadership. *Nuclear Safety*. 2026;16(2):91-105. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-09>

## The reputational potential of nuclear single-industry towns as a strategic resource for technological leadership

Nadezhda Yu. Lesnykh, Anastasiya A. Sozinova ✉, Nadezhda K. Savelyeva,  
Mariya V. Makarova

*Vyatka State University, Kirov, Kirov region, Russia Federation*

✉ [aa\\_sozinova@vyatsu.ru](mailto:aa_sozinova@vyatsu.ru)

**Abstract.** The current development paradigm of the Russian Federation is characterized by increased attention to ensuring technological leadership and state sovereignty. In this regard, the importance of high-tech single-industry towns, such as those hosting the Rosatom State Corporation, is growing. Despite their unique resource potential, these territories face an outflow of qualified personnel and image limitations due to their closed status, which poses the challenge for researchers to find strategic management tools that take into account the need for qualitative growth of their reputation. The objective of this article is to develop and test a methodological approach to the strategic analysis of the reputational potential of high-tech single-industry towns and, based on this, the formation of a development roadmap for the studied territories with the aim of ensuring and maintaining technological leadership. The research methodology is based on a three-stage algorithm: the first stage included a PESTEL analysis, Porter's Five Forces Framework, and key success factors analysis, while the second stage included a dynamic SWOT analysis using the methodology of P.A. Mikhnenko, with an expert assessment of the impact of external and internal environmental factors, and the third stage, a prioritized roadmap for developing the reputational potential of nuclear single-industry towns was developed. Results: key challenges (competition for human capital, environmental quality requirements, closed administrative-territorial entity restrictions) and opportunities (government support, new technologies) are identified; It is substantiated that the market power of consumers and suppliers shapes the «reputational vulnerability contour»; balanced dynamic assessments of strategic development alternatives for nuclear single-industry towns are obtained; and a roadmap for developing the reputational potential of nuclear single-industry towns through 2030 is developed, including nine areas grouped into three priorities (urgent, medium-term, and long-term implementation). The proposed approach can be used to update the socioeconomic development strategies of cities where Rosatom State Corporation operates and to formulate a unified reputation management policy for them.

**Keywords:** reputational potential, single-industry towns, nuclear cities, Rosatom, territorial brand, strategic planning, technological leadership, SWOT analysis, PESTEL analysis, roadmap, human capital

### Введение

Современная парадигма регионального развития в Российской Федерации характеризуется усилением внимания к вопросам технологического суверенитета и пространственного развития. Утвержденная «Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года»<sup>1</sup> фиксирует устойчивые тенденции к концентрации экономического роста, промышленности и научно-технологического потенциала на ограниченном числе территорий. В этих условиях обостряется конкуренция между регионами

и муниципальными образованиями за ключевой ресурс нового технологического уклада – человеческий капитал, в особенности за высококвалифицированную рабочую силу и креативный класс [1].

В конкурентной среде репутационные факторы территории перестают быть «мягкими» активами и превращаются в стратегический ресурс, способный оказывать прямое влияние на социально-экономическое развитие (далее – СЭР). Ученые утверждают, что системное формирование и управление репутационными факторами, в особенности территориальным брендом, способно стимулировать рост валового регионального продукта, улучшать демографические показатели и повышать инновационную активность [2,3]. Территориальный бренд, в отличие от стихийно формирующейся репутации, характеризуется управляемостью и возможностью целенаправленной коррекции, что делает его ключевым инструментом реали-

<sup>1</sup> Стратегия пространственного развития России до 2030 года с прогнозом до 2036 года. Министерство экономического развития Российской Федерации : официальный сайт. – Режим доступа: [https://www.economy.gov.ru/material/directions/regionalnoe\\_razvitie/strategicheskoe\\_planirovaniye\\_prostranstvennogo\\_razvitiya/strategiya\\_prostranstvennogo\\_razvitiya\\_rossii\\_do\\_2030\\_goda\\_s\\_prognozom\\_do\\_2036\\_goda/](https://www.economy.gov.ru/material/directions/regionalnoe_razvitie/strategicheskoe_planirovaniye_prostranstvennogo_razvitiya/strategiya_prostranstvennogo_razvitiya_rossii_do_2030_goda_s_prognozom_do_2036_goda/) (дата обращения: 05.01.2026).

зации стратегических приоритетов [4].

Выявленная проблематика актуальна для моногородов, в частности, для городов присутствия Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» (далее – моногорода Росатома). К числу таких городов относятся, например, Саров (Нижегородская область), Снежинск (Челябинская область), Железногорск (Красноярский край), Заречный (Пензенская область), Озерск (Челябинская область) и др. Они обладают уникальными научно-производственными комплексами, но сталкиваются с общими проблемами моногородов. С одной стороны, эти города обладают уникальным научно-техническим и инновационным потенциалом, являются центрами компетенций мирового уровня и играют ключевую роль в обеспечении технологического лидерства страны. С другой стороны, они сталкиваются с типичными для моногородов вызовами: узкая специализация экономики, зависимость от градообразующего предприятия, а также зачастую – негативные имиджевые характеристики («закрытый город», непривлекательная среда для молодежи), что провоцирует отток перспективных кадров [5].

Несмотря на очевидную значимость, вопросы оценки и интеграции репутационного потенциала атомных городов в документы стратегического планирования остаются недостаточно проработанными. Отсутствие единой методологии и четких показателей качества репутационных факторов не позволяет в полной мере использовать этот ресурс для достижения целей технологического лидерства.

Целью данной статьи является разработка и апробация методического подхода к стратегическому анализу репутационного потенциала моногородов присутствия Госкорпорации «Росатом» и формированию на его основе приоритетных направлений его развития, обеспечивающих технологическое лидерство территорий. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: 1) уточнить понятие «потенциал территориального бренда» применительно к высокотехнологичным моногородам и определить его структуру; 2) разработать и обосновать алгоритм стратегического анализа

репутационного потенциала моногородов Росатома, интегрирующий PESTEL-анализ, модель пяти сил Портера и динамический SWOT-анализ; 3) апробировать предложенный подход на примере городов присутствия Госкорпорации «Росатом» и на основе полученных динамических оценок сформулировать приоритетные стратегии, сгруппированные в дорожной карте по временным горизонтам реализации.

## Методы

В распоряжении специалистов по стратегическому управлению территориями сегодня находится достаточно широкий круг инструментов, и наиболее часто применяемыми среди них являются PESTEL-анализ, модель 5 конкурентных сил М. Портера и SWOT-анализ. PESTEL-анализ позволяет выявить основные тренды макросреды, модель Портера – охарактеризовать роль ключевых стейкхолдеров и распределение влияния между ними, а SWOT-анализ – свести воедино сильные и слабые стороны территории с теми возможностями и угрозами, которые заложены в текущей конъюнктуре внешнего окружения.

Вместе с тем управление развитием муниципального образования предполагает применение системных подходов, при которых стратегические намерения увязываются с реальными ресурсами и механизмами их достижения [6]. В научной литературе, посвященной методологии стратегического анализа, высказывается справедливое суждение: попытка опереться на какой-либо один метод, игнорируя присущие ему внутренние ограничения, способна привести к односторонним, а порой и ошибочным выводам. Только продуманная комбинация нескольких инструментов дает шанс компенсировать слабости каждого из них и получить более надежную основу для формулирования направлений стратегического развития территории [7].

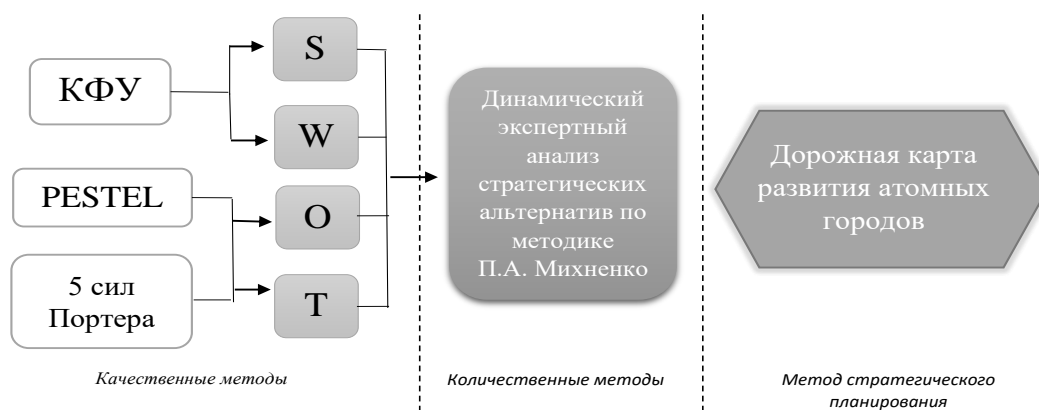
Существенным ограничением перечисленных ранее инструментов стратегического анализа остается их статичность – все они диагностируют конъюнктуру исследуемого объекта на текущий момент, оставляя неопределенной скорость, с которой управлен-

ческие воздействия способны изменить сложившуюся ситуацию. Для территорий, где инерция негативных имиджевых характеристик способна провоцировать отток квалифицированных кадров, подобный недостаток перестает быть чисто методической абстракцией и превращается в прямой фактор управленческой уязвимости.

Прежде чем переходить к описанию авторского методического подхода к стратегическому управлению репутационным потенциалом моногородов необходимо уточнить базовую категорию анализа. В рамках представленного исследования под «репутационным потенциалом моногорода» понимается способность его репутации влиять на будущее социально-экономическое развитие моногорода (приток квалифицированных кадров, инновационную активность,

приток инвестиций, рост ВРП и т.д.). Подобное понимание опирается на интеграцию основных подходов к трактовке термина «потенциал», сложившихся в научной и практической среде: ресурсного (Дж. Барни, Р. Грант, А.Г. Гранберг), инвестиционного (М. Портер, П. Кругман, О.В. Кузнецова), имиджевого (С. Анхольт, Ф. Котлер), управленческого (Г. Эшворт, М. Каварацис, Н.В. Зубаревич), инновационного (Р. Флорида, Ч. Лэндри) и комплексного (FutureBrand, Brand Finance).

Методический подход, который мы предлагаем для стратегического управления репутационным потенциалом городов Росатома в контексте их влияния на технологическое лидерство основан на трехэтапном алгоритме стратегического анализа (рис. 1).



**Рисунок 1.** Алгоритм стратегического анализа репутационного потенциала моногородов Росатома в контексте технологического лидерства [составлено авторами]

**Figure 1.** Algorithm of strategic analysis of the reputation potential of Rosatom single-industry towns in the context of technological leadership [compiled by the authors]

За основу взяты рекомендации ученых ВШЭ в области стратегического управления<sup>2</sup>. На первом этапе проводится диагностика внешней и внутренней среды с помощью качественных методов, включая идентификацию ключевых факторов успеха (далее – КФУ) территории и анализ факторов внешней среды с применением PESTEL-анализа и модели пяти сил Портера. На втором этапе осу-

ществляется оценка стратегических альтернатив на основе динамического экспертного анализа по методике П.А. Михненко [8]. Именно результаты этой оценки служат основой для разработки дорожной карты стратегического развития моногородов Росатома на третьем этапе.

Таким образом, **первый этап исследования** включал идентификацию факторов внешней и внутренней среды, определяющих репутационный потенциал моногородов Росатома в контексте технологического лидерства. Информационную базу первого этапа составили:

<sup>2</sup> Катъкало В.С. Методические указания для подготовки курсового проекта «SWOT-анализ»/ В.С. Катъкало, А.С. Веселова, С.В. Смелцова; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – Москва: Высшая школа бизнеса НИУ ВШЭ, 2021. – 68 с. Режим доступа: <https://u.to/tdqSIg> (дата обращения 12.01.2026).

– документы стратегического планирования (стратегии социально-экономического развития городов присутствия Госкорпорации «Росатом», программы развития атомной отрасли);

– статистические данные Росстата за 2020-2024 гг., позволившие оценить отраслевую структуру занятости, миграционные потоки, уровень инновационной активности предприятий;

– контент-анализ федеральных и региональных СМИ, а также публикаций в социальных сетях, отражающих актуальную повестку развития атомных городов.

Анализ внутренней среды осуществлялся через выделение КФУ территории, которые определялись как совокупность условий, обеспечивающих конкурентные преимущества атомных городов в привлечении человеческого капитала и реализации технологического лидерства. Анализ внешней среды проводился с использованием классических инструментов стратегического анализа: PESTEL-анализа и модели пяти сил Портера.

**Второй этап** исследования реализован на основе динамического SWOT-анализа, разработанного П.А. Михненко – модификации классического метода, направленной на преодоление его статичности. Суть данного подхода заключается в количественной оценке экспертами скорости достижения влияния элементов внешней и внутренней среды друг на друга, то есть того, насколько быстро территория способна использовать свои сильные стороны для реализации возможностей либо нейтрализовать угрозы.

Для проведения оценки была сформирована экспертная группа из восьми специалистов в области региональной экономики, стратегического планирования и территориального маркетинга, в т.ч. представителей научного сообщества и организаций, взаимодействующих с предприятиями атомной отрасли. Основным критерием отбора экспертов **послужило наличие у них опыта исследований закрытых территорий или работы на расположенных в них предприятиях**. Экспертная группа оценила скорость и направленность влияния выявленных элементов по шкале от -2 до +2, где +2 – максимально быстрое положительное влияние;

+1 – средняя положительность скорости влияния;

0 – отсутствие влияния;

-1 – средняя отрицательная скорость влияния;

-2 – максимально быстрое отрицательное влияние.

Методика П.А. Михненко предполагает введение «виртуального» (n+1)-го эксперта для повышения надежности расчетов в случае, если все эксперты выскажут единогласное мнение по скорости и направленности определенного элемента (то есть в случае, если среднее квадратическое отклонение оценок n экспертов равняется нулю). В таком случае в расчеты включается оценка «виртуального» эксперта, рассчитанная по формуле (1):

$$a_{ij}^{(n+1)} = a_{ij}^{(1)} + \delta, \quad (1)$$

где  $a_{ij}^{(1)}$  – оценка 1-го эксперта;

$\delta$  – коэффициент учета особенностей группы экспертов (в данном исследовании  $\delta = 0,5$ , что соответствует наличию высокого уровня необходимых компетенций у экспертов).

Итоговая взвешенная динамическая оценка  $a_{ij}$  для каждой пары соответствия рассчитывалась по формуле (2):

$$a_{ij} = a_{ij_{max}}^{-1} \sqrt{\frac{2\mu}{q}}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – среднее значение скорости достижения соответствия;

$q$  – среднее квадратическое отклонение экспертных оценок скорости достижения соответствия,

$a_{ij_{max}}$  – рассчитывается как отношение количества всех оценок к количеству оценок с показателями 2 и -2.

**Третий этап** предполагает разработку приоритизированной дорожной карты на основе полученных динамических оценок. Дорожная карта представляет собой документ стратегического планирования, определяющий последовательность, сроки и ожидаемые результаты реализации выбранных стратегий, сгруппированных по трем уровням приоритета: немедленная реализация

(приоритет 1), среднесрочная реализация (приоритет 2) и долгосрочная реализация (приоритет 3). Такой подход обеспечивает переход от диагностики и количественной оценки к конкретному плану действий, направленному на усиление репутационного потенциала атомных городов и достижение технологического лидерства.

Для перехода от матрицы динамических оценок к дорожной карте применялась процедура агрегирования и группировки стратегических альтернатив по следующим критериям: содержательная близость комбинаций факторов, относящихся к одной сфере

управления, синергетический эффект и административная целесообразность.

### Результаты

Применение описанного методического подхода к стратегическому анализу репутационного потенциала моногородов присутствия Госкорпорации «Росатом» позволило получить результаты, отраженные в таблицах 1 и 2. Для наглядного представления результатов оценки влияния конкретных сил на репутационный потенциал атомных городов построена лепестковая диаграмма, отражающая конфигурацию конкурентной среды (рис. 2).

**Таблица 1.** PESTEL-анализ влияния внешней среды на репутационный потенциал моногородов Росатома (в контексте технологического лидерства) [составлено авторами]

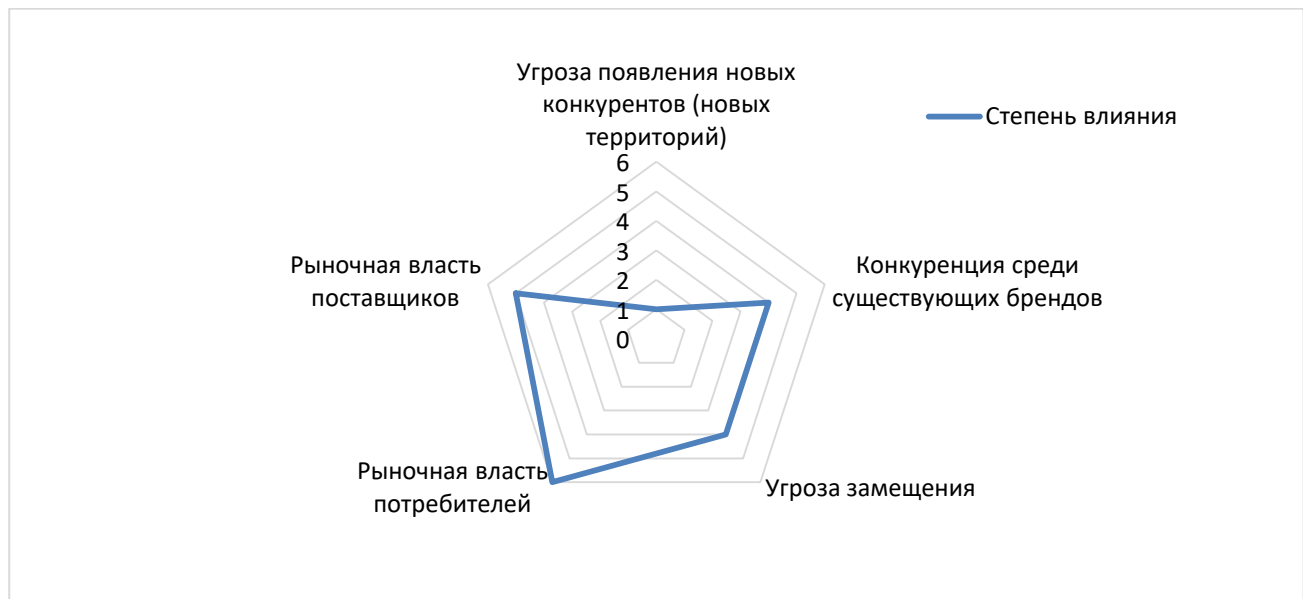
**Table 1.** PESTEL analysis of the external environment influence on reputational potential of Rosatom single-industry towns (in the context of technological leadership) [compiled by the authors]

Фактор	Характер влияния/ Значимость	Влияние на технологическое лидерство
<b>Политические (P)</b>		
Закрепление статуса «наукограда» / ТОСЭР в НПА	Позитивное/ Существенный	Создает правовую базу и преференции для развития инноваций
Государственная политика импортозамещения и обеспечения технологического суверенитета	Позитивное/Существенный	Повышает спрос на продукцию и компетенции атомной отрасли
<b>Экономические (E)</b>		
Концентрация экономического роста в ограниченном числе центров	Двойственное / Существенный	<i>Угроза:</i> отток капитала и кадров. <i>Возможность:</i> кооперация с лидерами
Финансирование государственных программ развития атомной энергетики и смежных технологий	Позитивное /Существенный	Обеспечивает ресурсную базу для развития городов и их брендов
<b>Социальные (S)</b>		
Усиление конкуренции за человеческий капитал (креативный класс, молодежь)	Негативное/ Существенный	Требует формирования привлекательного имиджа города для удержания и привлечения талантов
Рост требований к качеству городской среды и разнообразию досуга	Негативное / Значимый	Без развития соцкультбыта даже сильный научный бренд не удержит молодежь
<b>Технологические (T)</b>		
Концентрация научно-технологического развития в федеральных центрах и отдельных кластерах	Двойственное/ Существенный	<i>Угроза</i> для слабых городов. <i>Возможность</i> для городов Росатома стать центрами притяжения
Развитие новых технологий (искусственный интеллект, новые материалы)	Позитивное/ Существенный	Укрепляет значимость научных школ атомных городов
<b>Экологические (E)</b>		
Высокие стандарты экологической безопасности Госкорпорации «Росатом»	Позитивное/Значимый	Формирует имидж «чистого» и безопасного производства
<b>Правовые (P)</b>		
Особый правовой статус (ЗАТО)	Двойственное/Значимый	С одной стороны – защита и господдержка, с другой – барьеры для въезда и открытости

**Таблица 2.** Оценка влияния конкурентных сил на репутационный потенциал атомных городов [составлено авторами]

**Table 2.** Assessment of competitive force impact on reputational potential of nuclear cities [compiled by the authors]

Конкурентная сила	Оценка, <i>min = 1,</i> <i>max = 6</i>	Характеристика влияния
Угроза появления новых конкурентов (новых территорий)	1	Появление новых моногородов с аналогичным научно-производственным профилем маловероятно в силу высоких входных барьеров (инфраструктура, кадры, статус).
Конкуренция среди существующих брендов	4	Высокая конкуренция между атомными городами и другими научными центрами за кадры и инвестиции. Может быть трансформирована в сотрудничество при формировании зонтичного макробренда «Города Росатома».
Угроза замещения	4	Существует риск замещения атомных городов как мест притяжения для талантов со стороны крупных мегаполисов, университетских центров и комфортных для жизни регионов.
Рыночная власть потребителей	6	Критически высокая зависимость от предпочтений высококвалифицированных специалистов и их семей. Их запрос на качество жизни, открытость и разнообразие является определяющим для развития территории.
Рыночная власть поставщиков	5	Высокая зависимость от Госкорпорации «Росатом» как главного «поставщика» ресурсов, стратегий и социальных гарантий. Политика Корпорации оказывает решающее влияние на развитие городов присутствия.



**Рисунок 2.** Визуализация степени влияния внешней среды на репутационный потенциал атомных городов по модели 5 сил Портера [составлено авторами]

**Figure 2.** Visualization of the degree of external environment influence on reputational potential of nuclear cities according to Porter's Five Forces model [compiled by the authors]

Как видно из диаграммы (рис. 2), наиболее значимыми силами, формирующими «контур репутационной уязвимости», выступают рыночная власть потребителей и поставщиков, что требует выстраивания сбалансированной политики взаимодействия как с Госкорпорацией, так и с целевыми аудиториями. Конкуренция и угроза заме-

щения, при их высокой значимости, могут быть частично нивелированы за счет кооперации в рамках зонтичного бренда.

На основе выявленных факторов была составлена матрица SWOT-анализа (табл. 3), отражающая потенциала территориального бренда моногородов Росатома в контексте задач технологического лидерства.

**Таблица 3.** Матрица SWOT-анализа потенциала территориального бренда моногородов Росатома в контексте задач технологического лидерства [составлено авторами]**Table 3.** SWOT analysis matrix of territorial brand potential of Rosatom single-industry towns in the context of technological leadership tasks [compiled by the authors]

Сильные стороны (S)	Слабые стороны (W)
1. Уникальные научные школы и исследовательская инфраструктура (S1). 2. Высококвалифицированные кадры, профильное образование (S2). 3. Поддержка со стороны Госкорпорации «Росатом» (S3). 4. Положительный образ «надежности» и «технологичности» (S4).	1. Моноспециализация, узость рынка труда (W1). 2. Имидж «закрытого», некомфортного для молодежи города (W2). 3. Слабая диверсификация городской среды и досуга (W3). 4. Недостаточная открытость и коммуникационная активность (W4).
Возможности (O)	Угрозы (T)
1. Формирование зонтичного бренда «Города Росатома» (O1). 2. Развитие промышленного и научного туризма (O2). 3. Включение в федеральные программы по развитию инновационных кластеров (O3). 4. Цифровизация коммуникаций и создание онлайн-платформ для привлечения талантов (O4).	1. Отток молодежи и талантов в крупные города (T1). 2. Усиление конкуренции со стороны других научных центров (T2). 3. Снижение интереса к рабочим специальностям на фоне популяризации IT и креативных индустрий (T3).

Сформированная матрица SWOT-анализа (табл. 3) легла в основу дальнейшей количественной оценки. На втором этапе исследования экспертной группе было предложено оценить скорость и направленность влияния каждой пары соответствия «сила-возможность», «сила-угроза», «слабость-возможность» и «слабость-угроза» по шкале, описанной в разделе «Методы». В результа-

те обработки экспертных данных по формулам (1) и (2) получена матрица взвешенных динамических оценок (табл. 4). Тепловая шкала позволяет наглядно определить, на каких стратегических альтернативах следует сконцентрировать усилия в первую очередь для достижения быстрого и значимого эффекта.

**Таблица 4.** Матрица взвешенных динамических оценок стратегических альтернатив для моногородов Росатома с тепловой шкалой приоритизации [составлено авторами]**Table 4.** Matrix of weighted dynamic assessments of strategic alternatives for Rosatom single-industry towns with a prioritization heat map [compiled by the authors]

		Возможности				Ср. значение S
		O <sub>1</sub>	O <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	O <sub>4</sub>	
Сильные стороны	S <sub>1</sub>	131	71	143	98	111
	S <sub>2</sub>	124	81	143	131	120
	S <sub>3</sub>	259	131	259	94	186
	S <sub>4</sub>	259	120	81	143	151
Ср. значение O		193	101	157	117	
		Возможности				Ср. значение S
		O <sub>1</sub>	O <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	O <sub>4</sub>	
Слабые стороны	W <sub>1</sub>	92	62	141	92	97
	W <sub>2</sub>	167	92	167	92	130
	W <sub>3</sub>	167	62	141	141	128
	W <sub>4</sub>	141	256	183	256	209
Ср. значение O		142	118	158	145	
		Угрозы			Ср. значение T	
		T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>		
Сильные стороны	S <sub>1</sub>	0	103	59	54	

Продолжение таблицы 4  
 Table 4 continuation

		Угрозы			Ср. значение T
		T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	
Сильные стороны	S <sub>2</sub>	120	103	217	147
	S <sub>3</sub>	50	120	97	89
	S <sub>4</sub>	-49	103	120	58
Ср. значение T		30	107	123	
		Угрозы			Ср. значение T
		T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	
Слабые стороны	W <sub>1</sub>	-143	-130	-86	-120
	W <sub>2</sub>	-251	-123	-71	-148
	W <sub>3</sub>	-251	-121	-123	-165
	W <sub>4</sub>	-123	-255	-180	-186
Ср. значение T		-192	-157	-115	
Уровень различия	<-200	-200-0	0-140	140-200	>200
	критические угрозы	значимые риски	умеренный приоритет	высокий приоритет	максимальный приоритет

Представленная матрица (табл.4) визуализирует результаты количественной оценки скорости достижения влияния элементов внутренней среды на элементы внешней среды. Числовые значения в ячейках отражают интегральные динамические оценки, рассчитанные по методике П.А. Михненко. Цветовые коды наглядно демонстрируют ранжирование стратегических альтернатив по их приоритетности реализации:

- красный цвет (>200) – максимальный приоритет ввиду наиболее высокой скорости достижения эффекта. В отдельных случаях комбинации с оценками выше 200 могут быть отнесены к среднесрочному горизонту, если их реализация технологически или организационно невозможна в краткосрочной перспективе;
- желтый цвет (от 140 до 200) – высокий приоритет ввиду значительного потенциала.

Часть из них может быть реализована в краткосрочном периоде при наличии организационных возможностей;

- зеленый цвет (от 0 до 140) – умеренный приоритет стратегических альтернатив. Данные альтернативы целесообразно отнести к долгосрочной перспективе реализации;
- голубой цвет (от –200 до 0) – значимые риски, нейтрализация которых осуществляется в рамках стратегий долгосрочного развития.
- синий цвет (<-200) – критические угрозы, требующие выделения в отдельный блок компенсаторных мер с наивысшим приоритетом.

На основе полученных оценок (см. табл. 4) разработана дорожная карта реализации стратегии развития репутационного потенциала моногородов Росатома (табл. 5).

**Таблица 5.** Приоритизированная дорожная карта реализации стратегий развития репутационного потенциала моногородов Росатома [составлено авторами]

**Table 5.** Prioritized roadmap for implementing strategies to develop reputational potential of Rosatom single-industry towns [compiled by the authors]

Стратегические направления	Ключевые мероприятия	Ожидаемые результаты
<b>ПРИОРИТЕТ 1 до 2027 г. (немедленная реализация)</b>		
1. Формирование зонтичного бренда «Города Росатома» (S3+O1, S4+O1 – 259)	Создание единой бренд-платформы; разработка визуальной идентификации и коммуникационной стратегии; синхронизация маркетинговых активов всех городов присутствия	Единый макробренд, усиление узнаваемости, привлечение талантов и инвесторов

Продолжение таблицы 5

Table 5 continuation

Стратегические направления	Ключевые мероприятия	Ожидаемые результаты
2. Развитие научно-промышленного туризма (W4+O2 – 256, W2+O2 – 167)	Создание туристических маршрутов с посещением научных объектов; разработка программ открытых дверей; формирование событийного календаря	Преодоление имиджа «закрытости», новые рабочие места, дополнительные доходы
3. Цифровизация коммуникаций и онлайн-платформы для талантов (W4+O4 – 256)	Создание единого портала «Города Росатома»; запуск карьерных онлайн-платформ; активное продвижение в социальных сетях	Информационная открытость, привлечение молодых специалистов
4. КОМПЕНСАТОРНЫЕ МЕРЫ: нейтрализация критических угроз (W2+T1 – –251, W3+T1 – –251)	Разработка и реализация программы «Комфортная городская среда»; создание современных общественных пространств; поддержка молодежных инициатив и городских сообществ; формирование системы наставничества и адаптации молодых специалистов	Снижение оттока молодежи, повышение удовлетворенности жизнью, удержание талантов
<b>ПРИОРИТЕТ 2 до 2028 г. (среднесрочная реализация)</b>		
5. Активное участие в федеральных программах развития инновационных кластеров (S1+O3, S2+O3 – 143, S3+O3 – 259, W1+O3, W3+O3 – 141)	Поддача заявок на участие в федеральных программах; создание консорциумов с ведущими вузами и научными центрами; развитие кооперационных связей	Дополнительное финансирование, усиление научной базы, диверсификация экономики
6. Создание системы «социальных лифтов» и карьерных треков (S2+T1 – 120, S2+T3 – 217)	Разработка программ стажировок и практик; создание молодежных научных лабораторий; формирование понятных траекторий профессионального роста	Закрепление молодежи, повышение престижа рабочих профессий
7. Программы релокации и адаптации молодых специалистов (W2+T1 – компенсация)	Создание сервисных пакетов для переезжающих специалистов (жилье, поддержка семьи); развитие института кураторства	Привлечение кадров из других регионов, снижение дефицита специалистов
<b>ПРИОРИТЕТ 3 до конца 2030 г. (долгосрочная реализация)</b>		
8. Развитие креативных индустрий и городских сообществ на базе промплощадок (W2+T3, W3+T3 – –123, W3+O2, W3+O3 – 141)	Создание арт-резиденций и коворкингов; поддержка локальных креативных проектов; вовлечение градообразующих предприятий в развитие городской среды	Диверсификация досуга, формирование креативного класса, новая городская идентичность
9. Диверсификация досуга и формирование современной городской идентичности (W3+O2, W3+O3 – 141)	Развитие событийного туризма; создание общественных пространств; поддержка локальных культурных инициатив	Повышение качества жизни, привлекательность для молодежи

Реализация предложенных мероприятий в указанной последовательности гипотетически позволит не только усилить репутационный потенциал атомных городов, но и обеспечить их вклад в достижение технологического лидерства страны.

Поясним, что из 28 комбинаций факторов, представленных в матрице (табл. 4), в дорожную карту вошли 9 стратегических направлений, сформированных путем агрегирования содержательно близких альтерна-

тив. Комбинации с высокими оценками, не вошедшие в итоговый перечень (например, S1+O2, S2+O2), были исключены по следующим причинам: дублирование с другими стратегиями (так, S1+O2 – популяризация науки через туризм – вошла в стратегию 2 как составная часть), либо сложность реализации в рамках существующих управленческих механизмов. Принципы группировки представлены в таблице 6.

**Таблица 6.** Принципы агрегирования комбинаций факторов в стратегические направления дорожной карты [составлено авторами]

**Table 6.** Principles of aggregating factor combinations into roadmap strategic directions [compiled by the authors]

Стратегическое направление	Включенные комбинации	Основание для группировки
1. Формирование зонтичного бренда «Города Росатома»	S3+O1, S4+O1	Единая сфера – брендинг территории
2. Развитие научно-промышленного туризма	W4+O2, W2+O2	Единая сфера – туризм и открытость
3. Цифровизация коммуникаций	W4+O4	Самостоятельное направление
4. Компенсаторные меры	W2+T1, W3+T1	Критические угрозы, требующие немедленного реагирования
5. Участие в федеральных программах	S1+O3, S2+O3, S3+O3, W1+O3, W3+O3	Единый механизм – привлечение внешних ресурсов
6. Социальные лифты и карьерные треки	S2+T1, S2+T3	Единая сфера – кадровое развитие
7. Программы релокации	W2+T1	Производное от компенсаторных мер
8. Креативные индустрии	W2+T3, W3+T3, W3+O2, W3+O3	Единая сфера – развитие городской среды
9. Диверсификация досуга	W3+O2, W3+O3	Производное от развития городской среды

Связь предложенных стратегических направлений (см. табл. 5,6) с технологическим лидерством обеспечивается через следующие механизмы:

- формирование зонтичного бренда повышает привлекательность атомных городов для высококвалифицированных исследователей и инженеров, составляющих кадровую основу технологического развития;

- участие в федеральных инновационных программах (стратегия 5) напрямую расширяет научно-производственную базу и усиливает конкурентные позиции в сфере высоких технологий;

- развитие человеческого капитала через систему социальных лифтов и карьерных треков (стратегия 6) обеспечивает воспроизводство научных и инженерных кадров;

- улучшение городской среды и развитие креативных индустрий (стратегии 8-9) создают условия для закрепления талантливой молодежи, предотвращая отток критически важного для технологического развития человеческого капитала.

### Обсуждение

Проанализируем полученную дорожную карту реализации стратегий развития репутационного потенциала моногородов Росатома (табл. 5). Блок наиболее приоритетных мер, которые необходимо реализовать в ближайший год, включает в себя два основ-

ных направления. Во-первых, это укрупненный блок мер, направленных на преодоление устоявшегося восприятия атомных городов как закрытых городов с малыми коммуникационными и социальными возможностями для жителей. Прежде всего это меры по формированию и популяризации зонтичного бренда «Города Росатома» с целью повышения уровня информированности населения Российской Федерации о перспективах и преимуществах этих территорий. Решение о формировании именно зонтичного бренда обосновано синергетическим эффектом от консолидации маркетинговых усилий. Создание единой цифровой коммуникационной платформы зонтичного бренда безусловно существенно снижает издержки на продвижение и позволяет охватить наиболее широкую аудиторию, а запуск научно-промышленных туров формирует новые точки контакта с потенциальными резидентами и инвесторами.

Однако успешное функционирование единой платформы бренда столь разрозненных территорий требует создания специализированного координирующего органа. К примеру, таким органом могла бы стать «Ассоциация атомных городов», в состав которой войдут представители Госкорпорации «Росатом», муниципальных властей, общественных организаций и, в перспективе, региональных органов власти. Такая ор-

ганизационная структура сохраняет стратегическое влияние Росатома и обеспечивает учет интересов всех заинтересованных населенных пунктов и их жителей. Финансирование маркетинговых мероприятий предполагается обеспечивать по смешанной модели: за счет средств Госкорпорации «Росатом», а также муниципальных бюджетов и грантовых средств. Детальный регламент и механизмы принятия решений в рамках деятельности предлагаемого координирующего органа, конечно, требуют отдельной детальной проработки.

Постоянно действующий координирующий орган, кроме того, важен для реализации второго направления блока приоритетных мер. Параллельно с внешним ребрендингом атомных городов в дорожной карте запланированы мероприятия по улучшению качества городской среды. Без реальных изменений инфраструктуры возникает диссонанс между образом и реальностью, только усугубляющий репутационный кризис моногородов. Следовательно, важно не только инициировать и курировать формирование бренда, но и синхронно приводить в соответствие с ним ресурсную и инфраструктурную базу городской среды. Примером может служить опыт города Иннополис (Республика Татарстан). При его проектировании удалось выдержать необходимый уровень качества городской среды, сопоставимый с выраженным научно-технологическим брендом. Координирующий орган «Ассоциация атомных городов» организует согласование единых стандартов благоустройства, обмен лучшими практиками, а также оказывает содействие в привлечении финансирования. Таким образом, можно заключить, что комфортное городское пространство и статус инновационного, технологического центра имеют потенциал взаимно усиливать друг друга, а предложенная структура управления способна обеспечить необходимую для реализации предложенных мер координацию.

Среднесрочный блок включает в себя инициативы, которые по оценкам экспертов отличаются выраженным мультипликативным эффектом, но при этом являются с точки зрения быстроты реализации практически

невыполнимыми. Согласование нормативной базы, налаживание коммуникационных и кооперационных связей с вузами и промышленными партнерами и проч. – на все это требуется значительное время. Так, полноценное включение атомных городов в федеральные программы развития инновационных кластеров предполагает значительный объем подготовительных работ. То же самое относится к стратегии построения системы «социальных лифтов» и карьерных треков. Согласно данным таблицы 4 соответствующая комбинация (S2+T3) получила одну из наиболее высоких оценок (217), что говорит о признании экспертами колоссального потенциала данной стратегии, но ее реализация требует значительного пересмотра образовательных программ, создания площадок для стажировок и даже, возможно, смены поколенческих установок. Можно заключить, что стратегии второго временного периода являются основой формирования устойчивого положительного репутационного развития моногородов, но отличаются от стратегий первого периода организационной сложностью.

Стратегии долгосрочного периода еще больше направлены на глубинное переформатирование городской идентичности. Создание арт-резиденций и коворкингов, вовлечение градообразующих предприятий в преобразование городской среды, а также креативные, образовательные и прочие инициативы формируют совершенно новую среду. Данные меры направлены на формирование глубинной лояльности местных жителей и окончательную смену социального ландшафта, не только привлекающего новый пласт креативных резидентов, но и формирующего его из подрастающего поколения местных жителей.

Полученная дорожная карта является не просто перечнем рекомендуемых мероприятий, ранжированных по степени срочности, а отражает определенную логику трансформации репутации моногородов: от купирования угроз и выстраивания внешнего имиджа к постепенному закладыванию основ глубинных культурных сдвигов, закрепляющих желаемый образ городов Росатома в сознании стейкхолдеров.

Результаты представленного исследования подтверждают гипотезу о том, что системное управление репутационными факторами и территориальным брендом может выступать инструментом реализации стратегических приоритетов опережающего технологического развития Российской Федерации. Предложенный и апробированный методический подход доказал свою эффективность для стратегического планирования развития атомных городов, однако стоит отметить, что он также применим и для территорий другого типа. Адаптивность подхода обеспечивается за счет изменения критериев отбора экспертов, возможности корректировки значимости определенных факторов PESTEL-анализа, конфигурации конкурентных сил, перечня ключевых факторов успеха и, соответственно, сильных и слабых сторон SWOT-матрицы применительно к территориям другой специфики.

## Заключение

Апробация предложенного методического подхода к стратегическому анализу репутационного потенциала высокотехнологичных моногородов на примере городов присутствия Госкорпорации «Росатом» позволила получить следующие результаты:

– PESTEL-анализ выявил ключевые вызовы внешней среды (усиление конкуренции за человеческий капитал, рост требований к качеству городской среды, ограничения особого правового статуса ЗАТО) и возможности (государственная политика технологического суверенитета, финансирование атомной отрасли, развитие новых технологий);

– анализ пяти сил Портера показал, что наиболее значимыми факторами, формирующими «контур репутационной уязвимости», выступают рыночная власть потребителей (высококвалифицированных специалистов) и поставщиков (Госкорпорации «Росатом»), что требует выстраивания сбалансированной политики взаимодействия с обеими группами;

– на основе матрицы SWOT идентифицированы сильные стороны (уникальные научные школы, высококвалифицированные кадры, поддержка Росатома, образ надежно-

сти и технологичности) и слабые стороны (моноспециализация, имидж закрытости, неразвитая городская среда, недостаточная открытость);

– динамический экспертный анализ позволил получить матрицу взвешенных оценок, ранжирующую стратегические альтернативы по скорости достижения эффекта. Выявлены комбинации с максимальным приоритетом (формирование зонтичного бренда, развитие научно-промышленного туризма, цифровизация коммуникаций – 256-259 баллов), а также критические сочетания слабых сторон и угроз (W2+T1 и W3+T1–251), требующие безотлагательных компенсаторных мер;

– на основе полученных динамических оценок разработана приоритезированная дорожная карта, структурированная по трем временным периодам, включающая девять стратегических направлений.

Разработанная дорожная карта и предложенный методический подход могут быть непосредственно использованы при актуализации стратегий социально-экономического развития и мастер-планов атомных городов, а также при формировании единой политики управления репутационным потенциалом городов присутствия Госкорпорации «Росатом». Формирование зонтичного бренда «Города Росатома», развитие научно-промышленного туризма и цифровизация коммуникаций открывают возможности для трансформации имиджа этих территорий из «закрытых атомных городов» в привлекательные и открытые центры инноваций, способные выигрывать конкуренцию за лучшие умы и обеспечивать кадровый суверенитет высокотехнологичной отрасли. Отследить эффективность предложенных мер возможно за счет мониторинга определенных показателей, например количества специалистов, проработавших на предприятиях атомной отрасли более трех лет; объема финансирования, привлеченного в рамках участия в грантах и федеральных программах инновационного развития; а также индекса узнаваемости зонтичного бренда (согласно данным социологических исследований).

Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку и валидацию ко-

личественной методики оценки индекса репутационного потенциала атомного города на основе статистических данных и данных мониторинга социальных медиа, на адаптацию предложенного подхода к другим типам

моногородов и высокотехнологичных территорий, а также на разработку регламента деятельности предлагаемого координирующего органа («Ассоциации атомных городов»).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Тинякова В. И., Морозова Н. И., Диваева Э. А. Бренд территории как ответ вызовам глобализации и распространению массовой культуры. *Дискуссия*. 2024;1(122):102-103. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/brend-territorii-kak-otvet-vyzovam-globalizatsii-i-rasprostraneniyu-massovoy-kultury> (дата обращения: 06.01.2026).

Tinyakova V. I., Morozova N. I., Divaeva E. A. Territory brand as a response to the challenges of globalization and the spread of mass culture. *Discussion*. 2024;1(122):102-103. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/brend-territorii-kak-otvet-vyzovam-globalizatsii-i-rasprostraneniyu-massovoy-kultury> (accessed: 06.01.2026).

2. Романишина Т. С. Планирование территориального развития: акцент на инвестиционную составляющую маркетинга территории. *Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ)*. – 2021;1(73):110-117. Режим доступа: [https://vestnik.rsue.ru/doc/vestnik/1\(73\)2021.pdf](https://vestnik.rsue.ru/doc/vestnik/1(73)2021.pdf) (дата обращения: 06.01.2026).

Romanishina T. S. Territorial development planning: emphasis on the investment component of territorial marketing. *Bulletin of the Rostov State University of Economics (RINH)*. 2021;1(73):110-117. (In Russ.). Available at: [https://vestnik.rsue.ru/doc/vestnik/1\(73\)2021.pdf](https://vestnik.rsue.ru/doc/vestnik/1(73)2021.pdf) (accessed: 06.01.2026).

3. Пьянкова С.Г., Митрофанова И.В., Ергунова О.Т. Геобрендинг как драйвер развития региона в условиях нестабильности. *Экономика. Информатика*. 2022;49(4):645-660. EDN SCMEVI. <https://doi.org/10.52575/2687-0932-2022-49-4-645-660>

Ryankova S.G., Mitrofanova I.V., Ergunova O.T. Geobranding as a driver of regional development in conditions of instability. *Economy. Informatics*. 2022;49(4):645-660. (In Russ.). EDN SCMEVI. <https://doi.org/10.52575/2687-0932-2022-49-4-645-660>

4. Селюков М.В., Шалыгина Н.П., Шалыгина Т.О. Развитие регионального брендинга как маркетинговой технологии. *Современные проблемы науки и образования*. 2013;6:10541. Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=10541> (дата обращения: 06.01.2026).

Selyukov M.V., Shalygina N.P., Shalygina T.O. Development of regional branding as a marketing technology. *Modern problems of science and education*. 2013;6:10541 (In Russ.). Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=10541> (accessed: 06.01.2026).

5. Пьянкова С. Г. Проблемы и предлагаемые механизмы социально-экономического развития монопрофильных городов Российской Федерации. Актуальные проблемы, направления и механизмы развития производительных сил севера - 2018: Сборник статей Шестой Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием): в 3 частях, Сыктывкар, 19-21 сентября 2018 года. Том Часть III. Сыктывкар: ООО «Коми республиканская типография», 2018. С. 170-176. EDN YUOYDR. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36819366&ysclid=mou31uylgn572612000> (дата обращения: 09.01.2026).

Ryankova, S. G. Problems and proposed mechanisms for the socio-economic development of single-industry towns of the Russian Federation. Actual problems, directions and mechanisms for the development of productive forces of the North - 2018: Collection of articles of the Sixth All-Russian scientific and practical conference (with international participation): in 3 parts, Syktyvkar, September 19-21, 2018. Volume Part III. Syktyvkar: Komi Republic Printing House LLC, 2018. P. 170-176. (In Russ.). EDN YUOYDR. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36819366&ysclid=mou31uylgn572612000> (accessed: 09.01.2026).

6. Кузнецова О.В., Дружинин А.Г., Леонов С.Н. и др. Пространственное развитие России: муниципальное измерение. Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2026. 160 с. EDN PLLQUY. Режим доступа: <https://ecfor.ru/publication/prostranstvennoe-razvitie-rossii-munitsipalnye-obrazovaniya/?ysclid=mou35qr461194801205> (дата обращения: 09.01.2026).

Kuznetsova O.V., Druzhinin A.G., Leonov S.N. et al. Spatial development of Russia: municipal dimension. Moscow: KMK Scientific Publications Partnership. 2026. 160 p. EDN PLLQUY. (In Russ.). Available at: <https://ecfor.ru/publication/prostranstvennoe-razvitie-rossii-munitsipalnye-obrazovaniya/?ysclid=mou35qr461194801205> (accessed: 09.01.2026).

7. Тхагапсо М. Б., Котова Н.И. Особенности применения разных методов стратегического анализа для обоснования стратегического развития предприятия. *Экономика и бизнес: теория и практика*. 2021.;11-3(81):145-148. EDN ECCTSC. <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2021-11-3-145-148>

Thagapso M.B., Kotova N.I. Features of the application of different methods of strategic analysis to substantiate the strategic development of an enterprise. *Economy and business: theory and practice*. 2021;11-3 (81):145-148. (In Russ.). EDN ECCTSC. <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2021-11-3-145-148>

8. Михненко П.А. Динамическая модификация SWOT-анализа как инструмент стратегического планирования. *Экономический анализ: теория и практика*. 2019;18(11):2080-2098. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamicheskaya-modifikatsiya-swot-analiza?ysclid=mou3cqu218767091562> (дата обращения: 15.01.2026).

Mikhnenko P.A. Dynamic modification of SWOT analysis as a tool for strategic planning. *Economic analysis: theory and practice*. 2019;18(11):2080-2098. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamicheskaya-modifikatsiya-swot-analiza?ysclid=mou3cqu218767091562> (accessed: 15.01.2026).

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Лесных Н.Ю.** – изучение литературных источников по теме статьи, разработка методического подхода, написание текста статьи;

**Созинова А.А.** – постановка задачи, проверка результатов, редактирование текста статьи;

**Савельева Н.К.** – окончательное редактирование и одобрение варианта статьи;

**Макарова М.В.** – анализ предметной области и результатов, редактирование текста статьи.

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Lesnykh N.Yu.** – review of relevant literature, methodological approach development and writing of the article;

**Sozinova A.A.** – formulation of the problem, verification of results, and editing of the article;

**Savelyeva N.K.** – final editing and approval of the article;

**Makarova M.V.** – analysis of the subject area and results, and editing of the article.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

#### FUNDING:

The authors declare no funding sources.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

#### CONFLICT OF INTEREST:

There is no conflict of interest.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Надежда Юрьевна Лесных**, кандидат экономических наук, старший преподаватель кафедры менеджмента и маркетинга ФГБОУ ВО «ВятГУ», г. Киров, Кировская обл., Российская Федерация.  
e-mail: [usr23575@vyatsu.ru](mailto:usr23575@vyatsu.ru)

**Анастасия Андреевна Созинова**, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры менеджмента и маркетинга, заместитель директора института экономики и менеджмента по научной деятельности, ФГБОУ ВО «ВятГУ», г. Киров, Кировская обл., Российская Федерация.  
e-mail: [aa\\_sozinova@vyatsu.ru](mailto:aa_sozinova@vyatsu.ru)

**Надежда Константиновна Савельева**, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры менеджмента и маркетинга, директор института экономики и менеджмента, ФГБОУ ВО «ВятГУ», г. Киров, Кировская обл., Российская Федерация.  
e-mail: [nk\\_savelyeva@vyatsu.ru](mailto:nk_savelyeva@vyatsu.ru)

**Мария Владимировна Макарова**, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и маркетинга ФГБОУ ВО «ВятГУ», г. Киров, Кировская обл., Российская Федерация.  
e-mail: [usr21824@vyatsu.ru](mailto:usr21824@vyatsu.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Nadezhda Yu. Lesnykh**, Can. Sci. (Econ.), Senior Lecturer, Department of Management and Marketing, Vyatka State University, Kirov, Kirov region, Russian Federation.  
email: [usr23575@vyatsu.ru](mailto:usr23575@vyatsu.ru)

**Anastasia A. Sozinova**, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Department of Management and Marketing, Deputy Head for Research, Institute of Economics and Management, Vyatka State University, Kirov, Kirov region, Russian Federation.  
email: [aa\\_sozinova@vyatsu.ru](mailto:aa_sozinova@vyatsu.ru)

**Nadezhda K. Savelyeva**, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Department of Management and Marketing, Head of the Institute of Economics and Management, Vyatka State University, Kirov, Kirov region, Russian Federation.  
email: [nk\\_savelyeva@vyatsu.ru](mailto:nk_savelyeva@vyatsu.ru)

**Maria V. Makarova**, Can. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Management and Marketing, Vyatka State University, Kirov, Kirov region, Russian Federation.  
email: [usr21824@vyatsu.ru](mailto:usr21824@vyatsu.ru)

Поступила в редакцию / Received 21.02.2026

После доработки / Revision 20.05.2026

Принята к публикации / Accepted 26.05.2026

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

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-10>

УДК [378.147: 811.1]: 621.039

EDN PJJWCG


Оригинальная статья / Original paper



## Планирование и организация самостоятельного обучения иностранному языку работающих студентов технических вузов

Н.В. Бунамес  , И.А. Ухалина 

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская область, Российская Федерация

 NVBunames@mephi.ru

**Аннотация.** В данной работе исследуется возросший интерес к изучению иностранных языков среди студентов, совмещающих обучение с работой в атомной отрасли. В условиях масштабного развития атомной энергетики в России молодые специалисты, занятые на строительстве новых энергоблоков, приобретают уникальный практический опыт и получают значительные преимущества для дальнейшего карьерного роста. Современные требования к работе на энергетических объектах предполагают уверенное владения иностранными языками. При этом у студентов, работающих на атомных электростанциях, зачастую недостаточно времени для глубокого изучения языка. Для решения данной проблемы предлагается внедрение индивидуальных учебных графиков и методов сетевого планирования, что обеспечивает равномерное распределение учебного материала на весь учебный период. Чтобы оптимизировать объем заданий и равномерно распределять время на индивидуальные занятия необходимо тщательно планировать и контролировать учебный процесс. В этом случае целесообразно прибегнуть к методу «сетевого планирования и управления», который опирается на сетевой график-схему. График работ подлежит строгому обязательному надзору, это полностью исключает любые отклонения от плана. При использовании сетевого подхода к планированию общий объем обязательных текстов для изучения и рекомендуемых материалов дополнительного чтения, указанных в программе, превращается в базовый минимум. Преимуществом сетевых методов планирования работ является возможность распределять работы во времени с учетом имеющихся резервов времени, позволяющих корректировать начало выполнения задания и его продолжительность под имеющееся свободное время студента. Такой подход позволяет даже студентам с низкой успеваемостью выполнять минимальный объем чтения обязательной и дополнительной литературы.

**Ключевые слова:** адаптация учебного расписания, планирование и организация учебного процесса, студенты-атомщики, иностранный язык, организация и структурирование, сетевой план, индивидуальный график выполнения работ, аннотирования и реферирования, профильная литература


**Для цитирования:** Бунамес Н.В., Ухалина И.А. Планирование и организация самостоятельного обучения иностранному языку работающих студентов технических вузов. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(2):106-115. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-10>

**For citation:** Bunames N.V., Ukhulina I.A. Planning and organising independent foreign language learning for working students at technical universities. *Nuclear Safety*. 2026;16(2):106-115. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-10>

## Planning and organising independent foreign language learning for working students at technical universities

Natalia V. Bunames  , Irina A. Ukhalina 

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,  
Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation*

 *NVBunames@mephi.ru*

**Abstract.** This paper considers the increased interest in learning foreign languages among students who combine their studies with work in the nuclear industry. With the rapid development of nuclear energy in Russia, young professionals involved in the construction of new nuclear power plants gain valuable practical experience and experience-based advantages for their future career growth. The current requirements to work at energy facilities necessitate a strong command of foreign languages. However, students working at nuclear power plants often lack the time to immerse themselves fully in language learning. To solve this problem, it is proposed to introduce individual study schedules and network planning methods, which ensures an even distribution of educational material throughout the entire study period. In order to optimize the number of assignments and evenly distribute time for individual studies, it is necessary to carefully plan and monitor the educational process. In this case, it is advisable to use the "network planning and management" method, which relies on a network diagram. The work schedule is subject to strict mandatory supervision, which completely eliminates any deviations from the plan. When using a network approach to planning, the total amount of required texts to study and recommended additional reading materials specified in the program is reduced to a basic minimum. The advantage of using network methods for planning work is the ability to distribute tasks over time, taking into account available time reserves, which allows for adjusting the start date and duration of a task to fit the student's available time. This approach enables even students with lower academic performance to complete the minimum amount of required and additional reading.

**Keywords:** adaptation of the curriculum, planning and organization of the educational process, nuclear engineering students, foreign language, organization and structuring, network plan, individual work schedule, abstracting and summarising, specialized literature

### Введение

ГК «Росатом» расширяет сферу своей деятельности, включая новые рынки и ядерные направления, что создает возможности для специалистов с разнообразным образованием. В ближайшие годы концерн Росэнергоатом намерен вывести из эксплуатации 13 энергоблоков и возвести 29 новых в России, плюс 14 за рубежом. Чтобы гарантировать безопасную и продуктивную работу этих объектов, важно заранее предсказывать кадровые нужды, организовывать обучение персонала и создавать резерв квалифицированных сотрудников. В связи с этим проводятся мероприятия по профориентации и поддерживаются ведущие вузы и школы в атомных городах.

Планы развития атомной энергетики внутри страны и за ее пределами формируют основу стратегии Госкорпорации «Росатом». Специалисты, занятые на строящихся энергоблоках сегодня, приобретают уникальный опыт, что дает им значительные преимущества в карьере в будущем. На многих российских АЭС в ближайшем будущем преду-

смотрено возведение замещающих мощностей, где молодые выпускники вузов смогут начать профессиональный путь и развивать карьеру. Это становится ключевым фактором, привлекающим молодежь к работе на атомных станциях.

Сегодня наблюдается увеличение числа студентов, которые сочетают обучение с трудовой деятельностью. Без сомнения, вопрос дохода особенно актуален для учащихся всех форм обучения. Если студент не занят работой, его основными источниками средств, помимо стипендии, становятся родительские дотации. Поэтому многие вынуждены трудоустраиваться, чтобы иметь собственные средства, – у большинства преобладают финансовые причины выхода на рынок труда в период учебы для покрытия личных расходов. Дополнительным стимулом к работе во время обучения служит убеждение, что такой опыт – отличная жизненная школа, которая повышает шансы на карьерный рост после окончания вуза.

Студенты с дипломом о среднем профессиональном образовании по специальности

«Атомные и электрические станции и установки» и зачисленные в ВИТИ НИЯУ МИФИ, приступают к работе на АЭС с 3-4 курса, и большинство успешно совмещают учебу с трудовой деятельностью благодаря гибкому расписанию и индивидуальному подходу преподавателей.

Тем не менее, сочетание учебы и работы сокращает время на самостоятельное изучение материала, особенно во время планово-предупредительных ремонтов, когда нагрузка на персонал увеличивается. Продолжительность и частота ремонтов определяются объемом и сложностью задач. График планово-предупредительных ремонтов всех атомных станций страны скоординирован, чтобы станции могли эффективно распределять трудовые ресурсы.

### **Особенности планирования и организации самостоятельной работы студентов при изучении иностранного языка**

В связи с активным участием России в проектировании и производстве оборудования для зарубежных атомных электростанций растет потребность в квалифицированных переводчиках. Однако постоянное содержание такого штата на предприятиях не всегда экономически оправдано.

Использование современных технологий в различных сферах требует уверенного знания иностранных языков. Изучение языков способствует лучшей интеграции студентов в общество, углублению знаний и адаптации к быстро меняющемуся миру с преобладанием многонациональных и поликультурных взаимодействий [1].

Главная цель преподавания иностранного языка в высшем образовании – развитие общих коммуникативных умений и специализированных профессиональных навыков. Центральный элемент изучения языка – способность применять полученные знания и умения в различных ситуациях общения, включая профессиональные контакты.

Для студентов, специализирующихся в области атомной энергетики, ключевым аспектом образовательного процесса является разработка системы поощрений и мотивации. Важную роль в этом играют руководители предприятий, которые подстраивают

рабочие расписания, чтобы выделить время на учебу. В свою очередь, обучающиеся должны понимать, насколько ценно владение языками для продвижения по службе в государственных корпорациях.

Трудовая деятельность в ведущих структурах атомной отрасли или продолжение обучения за границей предполагает для выпускников не только высокий уровень профессионализма, но и отличное знание иностранных языков. Способность вести деловые беседы на родном и зарубежных языках, а также широкий кругозор и отточенные умения станут залогом успеха будущих специалистов.

Чтобы подогнать языковое обучение под нужды студентов-атомщиков, стоит обогащать их словарный запас специальными отраслевыми терминами. Умение общения на иностранном языке выступает эффективным инструментом для улучшения профессиональных компетенций и предоставляет множество возможностей в научной и интеллектуальной сферах. Благодаря владению узкой терминологией обучающиеся могут извлекать информацию из зарубежных источников, переводить материалы по своей специальности, изучать актуальный контент на международных платформах, в СМИ и на сайтах [2]. Языковые способности помогают достичь успехов в командировках за рубеж, на конференциях, семинарах и глобальных обсуждениях.

Основываясь на важности владения профессиональной лексикой на иностранном языке, преподаватели обязаны включать ее в программу развития навыков устной и письменной речи у студентов.

В технических и иных неязыковых вузах главным приоритетом в языковом образовании является применение языка как средства общения. Каждый обучающийся должен уметь корректно и точно читать как общие, так и специализированные тексты, а в университетах также ожидается навык их перевода. Успешное овладение языками в значительной степени зависит от скорости и плавности чтения. Дополнительные требования включают понимание содержания, свободное манипулирование текстом и умение вести профессиональные разговоры на ино-

странном языке. Только точная интерпретация слов обеспечивает продуктивное взаимодействие. В языковом обучении, помимо чтения, говорения и восприятия речи, значимое место занимает письменная коммуникация. После окончания вуза специалисты будут использовать все эти методы в практике, поэтому их развитие должно быть гармоничным и качественным.

Необходимо отметить один из веских аргументов в пользу изучения иностранных языков – преодоление лингвистических барьеров, что позволит облегчить общение с людьми из других культур, способствуя пониманию их обычаев и традиций.

Освоение языков предоставляет значительное преимущество в конкурентной борьбе на рынке труда. Оно позволяет устанавливать связи с иностранными клиентами, партнерами и кандидатами, расширять рынки и продвигаться по карьерной лестнице. Специалисты с языковыми навыками могут работать в международных компаниях, заниматься экспортом, вести переговоры с зарубежными сторонами, участвовать в трансграничных инициативах, а также получать предложения о вакансиях за пределами родной страны.

В данной статье рассматриваются вопросы структурирования и планирования языкового обучения для студентов, вовлеченных в атомную энергетику. Основная сложность заключается в ограниченном времени у тех, кто сочетает учебу с практикой на атомных объектах. Известно, что основа успеха в настоящей и будущей карьере – это накопленный багаж знаний, учебные материалы должны быть доступны в любое время. Следовательно, преподавателям следует учитывать, какой именно контент нужен студенту и в каком виде его представить для максимальной пользы. Педагогам необходимо владеть методами организации самостоятельной работы обучающихся, которая является центральным элементом в системе обеспечения качества образования. Значение такой деятельности для студентов нельзя переоценить: она служит одной из основных частей учебного процесса, способствующей формированию навыков, способностей и компетенций. В связи с этим, создание

планов, координация и реализация самостоятельных занятий студентов становятся приоритетной задачей в их подготовке [3].

Студенты нередко воспринимают свою независимую учебную активность и самостоятельные задания лишь как выполнение домашних упражнений. Однако понятие самостоятельной работы гораздо шире и включает все виды индивидуальных занятий обучающихся как в аудитории, так и вне ее.

Особенно актуальной становится правильная организация такой деятельности при обучении иностранным языкам в технических университетах, где этот предмет не является профилирующим, что добавляет сложности в его изучении. Руководящая роль преподавателя в управлении самостоятельными занятиями не исключает активного участия самого студента. Без этого нарушается базовый принцип изучения языка – его коммуникативная направленность, при которой учитель и ученик выступают как партнеры в диалоге.

Для воплощения этого принципа мы рекомендуем использовать методы сетевого планирования и контроля, включая составление индивидуального плана задач, который обеспечивает равномерное распределение учебного материала на семестр или год. Это оптимизирует работу студентов и преподавателей, улучшает структуру самостоятельных занятий, способствует быстрому усвоению знаний и снижает риски от злоупотребления цифровыми ресурсами. Важно также подчеркнуть пользу аннотирования и реферирования оригинальных статей из зарубежных журналов и книг, помогающих ознакомиться с международным опытом в области ядерной энергетики. Особенность такого подхода – коллективная работа в студенческих группах, что компенсирует дефицит времени на аудиторных уроках и индивидуальных сессиях [4].

Преподавателям вузов приходится решать сложную задачу: в ограниченные сроки подготовить обучающихся к чтению подлинных текстов по направлению «Ядерная энергетика» и специальности «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг», а главное – пробудить их интерес к практическому использованию иностран-

ного языка в профессиональной деятельности.

Учитывая уменьшение количества часов на аудиторных занятиях по языку, основой обучения и закрепления навыков становится самостоятельная работа студента. Здесь центральное значение имеет четкая организация внеаудиторной деятельности.

Для студентов, совмещающих учебу с трудовой деятельностью, выделить время на самостоятельные занятия бывает непросто. Причины этому следующие:

- у обучающихся отсутствует четкое планирование и структурирование. Рабочий график имеет строгие рамки, которые труднее соблюдать дома;

- при удаленной или смешанной форме работы (когда часть времени уходит на работу, а часть – на домашние дела) сложнее мотивировать студентов к учебе. Им нужны постоянные напоминания о важности саморазвития, и инициатива обычно исходит от преподавателя, куратора или наставника через личное общение;

- работающие студенты ощущают себя оторванными от образовательного процесса.

Удаленная работа способствует одиночеству, хотя обучение традиционно – социальный процесс. Не применяется один из самых действенных методов – групповая деятельность.

Опыт показывает, что студентов нужно учить самостоятельности, помогая им рационально и продуктивно использовать время на дисциплину. Много зависит от методических навыков преподавателя. В методике языкового обучения накоплен значительный опыт управления самостоятельной работой через комплексные домашние задания и серию проверочных работ, позволяющих оценить степень освоения отдельных грамматических тем путем применения знаний в упражнениях и переводе контрольных текстов.

Часто студентам предлагают обработать слишком большой объем информации, и из-за этого, плюс занятость на работе, у них не хватает времени. Все недочеты в самостоятельной работе приводят к слабой подготовке к экзаменам, механическому выполнению домашних и контрольных заданий по про-

граммам. Проблемы с усвоением материала проявляются только во время сессии, когда студент напрямую контактирует с преподавателем. В результате, как и ожидалось, обучающийся не справляется с экзаменационной сессией, накапливая академические задолженности. Изучение иностранного языка не является исключением из этой тенденции.

Из этого вытекает, что обучение языку для занятых студентов требует корректировки учебного подхода. Задача преподавателя – помочь учащемуся освоить запланированный на межсессионный период материал и развить навыки самоконтроля. Ведущий преподаватель решает вопросы организации учебного процесса как на уроках, так и во время домашних занятий.

Педагоги часто считают, что их обязанности ограничиваются передачей знаний, ответами на вопросы по ним, проведением тренингов с группой, проверкой понимания и выдачей домашних работ. На следующем занятии учитель оценивает выполненные задания, и цикл повторяется. На уроках по иностранному языку предлагается чтение текста вслух. Этот процесс включает в себя произнесение и перевод, то есть, основан на подходе «чтение – перевод». Правильность перевода проверяется по ответам студентов, которые готовились самостоятельно дома. В таком случае студенты, не подготовившие домашнее задание (чтение и перевод текста), не участвуют активно, а только слушают ответы одноклассников.

Особое внимание нужно уделять составлению аннотаций и рефератов оригинальных статей из зарубежных журналов и книг, что позволяет познакомиться с зарубежным опытом [5]. С первых занятий преподаватель мотивирует студентов к таким задачам, предлагая разработать персональный сетевой план – индивидуальный график работ. Изначально это вызывает у учащихся замешательство и сомнения, поскольку многие давно не занимались языком. Между тем правильный подбор текстов для детального и ознакомительного чтения, целенаправленное выполнение ограниченного числа упражнений, а также понятное объяснение

грамматических аспектов помогают преодолеть сложности.

По нашему мнению, обязательно нужно объяснить студентам, что подразумевается под детальным и ознакомительным чтением. Следует разъяснить, что при детальном чтении фокус на взаимосвязи слов в предложении и его структуре как ключевых элементах для понимания. По строению повествовательного предложения можно определить, описывается ли направленное действие, само действие или характеристика. Осознание этих принципов способствует более точному переводу с меньшими затратами времени.

При ознакомительном чтении профильных текстов важно разбираться в структуре предложения и всего текста. Перед обучающимися ставится задача поделиться полученными данными с другими. Поскольку уровень активного владения языковым материалом у студентов обычно невысок, они предпочитают общаться на русском. Оформление информации вызывает трудности даже на родном языке, поэтому их приходится специально этому обучать. Работу с текстом для ознакомительного чтения целесообразно завершать пересказом, развернутой аннотацией или кратким рефератом. Материалы подбирает преподаватель из научных изданий по специальности, учитывая интересы студентов.

Иногда учебный материал делится на фрагменты, чтобы облегчить самостоятельное изучение, особенно когда учащиеся не могут полноценно подготовиться из-за ограниченного времени. В таких ситуациях анализ одного текста растягивается на несколько занятий. Критерии оценки и объем требований остаются прежними, но студент постепенно адаптируется к процедуре опроса, выполняя работу без особого усилия, что в итоге сказывается на невысоких результатах обучения [7].

Ключевыми причинами, приводящими к сравнительно низкой успеваемости в изучении иностранного языка, считаются следующие:

а) недостаточное понимание преподавателем четкой цели передаваемой информации. Когда обучающийся читает иностран-

ный текст, он сталкивается с готовыми грамматическими структурами, поэтому и теоретические знания следует представлять в аналогичной форме.

б) предоставление только теоретических сведений без разбора текстов, без объяснения конкретных языковых оборотов и их роли не помогает закрепить материал надолго. Это приводит к тому, что студенты не могут использовать изученное в новых контекстах.

в) игнорирование личных особенностей каждого учащегося, вызванное сокращением аудиторных часов по языку, превращает студента в пассивного реципиента информации, лишённого активного участия [6].

г) отсутствие направляющего контроля над самостоятельной активностью обучающегося и мотивации к систематическим действиям в период между сессиями. Выполненная работа не проверяется своевременно, а итоговая оценка дается лишь во время экзаменов.

д) специфика обучения занятых студентов, особенности профессии специалиста в атомной энергетике с высокой рабочей нагрузкой и сложности в освоении дисциплин мешают организовать непрерывный процесс учебы. Самостоятельные занятия остаются без надзора преподавателя, так как под ними часто подразумевают лишь выполнение домашних заданий или переводов.

Чтобы повысить результативность самостоятельной работы, преподаватель должен акцентировать внимание на обучении студентов техникам самообучения непосредственно во время аудиторных занятий. Необходимо подчеркнуть самые действенные формы самостоятельной деятельности:

– выполнение заданий с последующей проверкой по ключам в режиме самопроверки;

– индивидуальное чтение текста, понимание общего смысла, затем пересказ или ответы на вопросы на родном языке в классе, а также самооценка вне занятий после овладения навыками внутреннего контроля;

– чтение материала с последующим изложением содержания устно или письменно, включая перевод, аннотацию или реферат [8];



Преимуществом сетевых методов планирования работ является возможность распределять работы во времени с учетом имеющихся резервов времени, позволяющих корректировать начало выполнения задания и его продолжительность под имеющееся свободное время студента. Все задания рас-

пределены по учебным неделям (рис. 2), в пределах которых можно устанавливать ранние и поздние сроки выполнения контрольных заданий, что позволяет определить резервы времени и оптимально их использовать в подготовке к занятиям.

**СЕТЕВОЙ ГРАФИК  
ТЕКУЩЕГО И ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОНТРОЛЯ НА 2024-2025 УЧ. ГОД (2 СЕМЕСТР)**

**Иванова Ивана Ивановича**  
(Ф.И.О. студента)

с «10» февраля 2025 по «25» мая 2025

**Форма обучения:** очная

**Направление подготовки / специальность** 14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг

**Дисциплина:** Иностранный (немецкий) язык, **Преподаватель:** Петрова Елена Сергеевна (кафедра «Иностранные языки», каб. 210).

**Используемая литература:** Учебник «Курс немецкого языка» под редакцией Е.Н. Канищевой, учебно-методическое пособие по иностранному (немецкому) языку

№	Наименование контрольного задания	Неделя семестра																	
		Раздел № 1			Контроль ая точка.	Раздел № 2			Итоговый равный контроль	Раздел 3			Контроль ая точка	Раздел № 4			Контрольная точка	Зачетная неделя	
		Max/ min баллы 12/20				Max/ min баллы 12/20				Max/ min баллы 12/20				Max/ min баллы 12/20				Max/ min баллы	
		3	4	5	3	5	4	5	4	3	4	5	3	12/20					
1.	Прочитать и перевести текст Das Atomzeitalter (T1), ответить на вопросы к тексту. Повторить грамматический материал из §§30, 32,33,35,40. Выполнить письменно упражнения № 1-8. С. 66-67.																		
2.	Выучить слова и выражения из упражнения №1 к тексту Das Atomzeitalter. Повторить грамматический материал из §§14,19, 40,55. Выполнить устно упражнения №10,11.17(а), №17(б) - письменно. С. 84-85.																		
3.	Подготовить аннотацию и реферат к тексту Das Atomzeitalter. Пересказать текст. Повторить времена глаголов в Aktiv. Повторить грамматический материал из																		

**Рисунок 2.** Пример распределения контрольных заданий по неделям семестра

**Figure 2.** Example of distribution of control tasks by weeks of the semester

Тщательный подбор содержания для обучения и его равномерное размещение в расписании, с учетом дат сдачи проверочных заданий, позволяет студентам осваивать материал на высоком уровне. Если же график работ подлежит строгому обязательному надзору, это полностью исключает любые отклонения от плана. При использовании сетевого подхода к планированию общий объем обязательных текстов для изучения и рекомендуемых материалов дополнительного чтения, указанных в программе, пре-

вращается в базовый минимум, доступный даже для студентов с низкой успеваемостью.

### Заключение

В итоге, применение передовых подходов к организации, контролю и планированию учебной деятельности улучшает уровень владения иностранным языком у учащихся, которые сочетают образование с занятостью в сфере атомной энергетики. Это играет ключевую роль в их профессиональном росте и продвижении по карьерной лестнице в глобальном контексте.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Михайлова Е.В. Влияние организации самостоятельной работы студентов на становление их готовности к самообразованию. Инновационные технологии в педагогике и на производстве: тезисы докладов VI научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. Екатеринбург: УГППУ, 2000. С. 36-37. Режим доступа: <https://elar.uspu.ru/handle/ru-uspu/16199> (дата обращения 02.09.2025).

Mikhailova E.V. The Influence of the Organization of Independent Work of Students on the Formation of Their Readiness for Self-Education. Innovative Technologies in Pedagogy and Production: Abstracts of the VI Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists. Yekaterinburg: USPU, 2000. Pp. 36-37. (in Russ). Available at: <https://elar.uspu.ru/handle/ru-uspu/16199> (accessed: 02.09.2025).

2. Каргина Е.М. Формирование у обучающихся навыков рационального способа поисковой и исследовательской деятельности в процессе изучения иностранного языка. *Современная педагогика*. 2014;9(22):52-54. Режим доступа: <https://pedagogika.snauka.ru/2014/09/2681> (дата обращения 02.09.2025).

Kargina E.M. Formation of students' skills in a rational way of search and research activities in the process of learning a foreign language. *Modern pedagogy*. 2014;9(22):52-54. (in Russ). Available at: <https://pedagogika.snauka.ru/2014/09/2681> (accessed: 02.09.2025).

3. Комарова Е.В. Самоконтроль и самоопределение как основные средства изучения иностранного языка. *Современные научные исследования и инновации*. 2015;1:53-55. Режим доступа: <https://web.snauka.ru/issues/2015/01/45294> (дата обращения: 02.09.2025).

Komarova E.V. Self-control and self-determination as the main means of learning a foreign language. *Modern scientific research and innovation*. 2015;1:53-55. (in Russ). Available at: <http://web.snauka.ru/issues/2015/01/45294> (accessed: 02.09.2025).

4. Яроцкая Л.В., Титкова О.И., Смольяникова И.А., Желнов И.И. Концептуальные основы информационно-образовательного ресурса «Межкультурная профессиональная коммуникация. Интернет-журнал «Науковедение». 2013;2(15):49. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/42pvn213.pdf> (дата обращения 02.09.2025).

Yarotskaya L.V., Titkova O.I., Smolyannikova I. A., Zhelnov I. I. Conceptual foundations of the information and educational resource «Intercultural professional communication». *Internet Journal «Naukovedenie»*. 2013;2(15):49 Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/42pvn213.pdf> (accessed: 02.09.2025).

5. Журбенко Н.Л. Методика обучения студентов реферированию профессионально-ориентированного текста в неязыковых технических вузах. *Мир науки. Педагогика и психология*. 2019;2(7). Режим доступа: <https://mir-nauki.com/PDF/58PDMN219.pdf> (дата обращения 02.09.2025).

Zhurbenko N.L. Modified method of teaching students secondary texts creation on the basis of professionally oriented texts in non-linguistic technical universities. *World of science. pedagogy and psychology*. 2019;2(7). (in Russ). Available at: <https://mir-nauki.com/PDF/58PDMN219.pdf> (accessed: 02.09.2025).

6. Каргина Е.М. Учет личностных особенностей, обучающихся как лингвистический фактор профилизации преподавания иностранного языка в техническом вузе. *Психология, социология и педагогика*. 2014;9(36):41-44. Режим доступа: <https://psychology.snauka.ru/2014/09/3643> (дата обращения: 02.09.2025).

Kargina E.M. Consideration of personal characteristics of students as a non-linguistic factor in the proficiency of teaching a foreign language in a technical university. *Psychology, sociology and pedagogy*. 2014;9(36):41-44 (in Russ). Available at: <https://psychology.snauka.ru/2014/09/3643> (accessed: 02.09.2025).

7. Зиновкина М.М., Утемов В.В. Инженерное мышление и технологии самообразования: монография. – М.: МГИУ, 2019. 210 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001760257> (режим доступа: 02.09.2025).

Zinovkina M.M., Utsomov V.V. Engineering thinking and self-education technologies: monograph. – M.: MGI, 2019. 210 p. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001760257> (accessed: 02.09.2025).

8. Михайлова Е.А. Влияние организации самостоятельной работы студентов на становление их готовности к самообразованию. Инновационные технологии в педагогике и на производстве: тезисы докладов VI научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, 25-26 апреля 2000 г., Екатеринбург: Издательство УГППУ, 2000. С. 36-37. Режим доступа: <https://elar.uspu.ru/handle/ru-uspu/16199> (дата обращения 02.09.2025).

Mikhailova E.A. The influence of the organization of independent work of students on the formation of their readiness for self-education. Innovative technologies in pedagogy and production: abstracts of the VI scientific-practical conference of young scientists and specialists, April 25-26, 2000, Yekaterinburg: Publishing house of the UGPPU, 2000. S. 36-37. Available at: <https://elar.uspu.ru/handle/ru-uspu/16199> (accessed: 02.09.2025).

9. Котова С.С. Технологии самоорганизации и саморазвития: монография. Екатеринбург: Изд-во РГППУ, 2022. Режим доступа: [https://elar.uspu.ru/bitstream/ru-uspu/42532/1/978-5-8050-0751-5\\_2022.pdf](https://elar.uspu.ru/bitstream/ru-uspu/42532/1/978-5-8050-0751-5_2022.pdf) (дата обращения 02.09.2025).

Kotova S.S. Technologies of self-organization and self-development: a monograph. Yekaterinburg: Publishing House of RGPPU, 2022. Available at: [https://elar.uspu.ru/bitstream/ru-uspu/42532/1/978-5-8050-0751-5\\_2022.pdf](https://elar.uspu.ru/bitstream/ru-uspu/42532/1/978-5-8050-0751-5_2022.pdf) (accessed: 02.09.2025).

## ВКЛАД АВТОРОВ:

**Бунамес Н.В.** – концептуализация статьи, предоставление материалов авторских исследований по изучаемой проблеме, формулирование выводов;

**Ухалина И.А.** – анализ аналитических обзоров специалистов в области развития территорий присутствия ГК «Росатом, обоснование необходимости применения принципа организации и управления учебным процессом.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Наталья Викторовна Бунамес**, кандидат филологических наук, доцент, начальник центра инноваций и развития, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<http://orcid.org/0000-0001-7957-694X>

e-mail: NVBunames@mephi.ru

**Ирина Анатольевна Ухалина**, кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и социально-гуманитарных дисциплин, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<http://orcid.org/0000-0002-1928-7510>

e-mail: IAUkhulina@mephi.ru

## AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Bunames N.V.** – conceptualization of the article, provision of author's research materials on the problem under study, formulation of conclusions;

**Ukhulina I.A.** – analysis of analytical reviews by specialists in the field of development of territories where Rosatom State Corporation operates, justification of the need to apply the principle of organisation and management of the educational process.

## FUNDING:

The study had no external funding.

## CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Natalia V. Bunames**, Can. Sci. (Philol.), Associate Professor, Head of the Innovation and Development Center, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<http://orcid.org/0000-0001-7957-694X>

e-mail: NVBunames@mephi.ru

**Irina A. Ukhulina**, Can. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of Economics and Socio-Humanitarian Disciplines, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<http://orcid.org/0000-0002-1928-7510>

e-mail: IAUkhulina@mephi.ru

Поступила в редакцию / Received 12.12.2025

После доработки / Revision 13.05.2026

Принята к публикации / Accepted 15.05.2026

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

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-11>

УДК [331.45+338.45]:65.012

EDN VJXYCQ

Оригинальная статья / Original paper



**Устойчивое достижение нулевого LTIFR и экономическая эффективность мер промышленной безопасности в металлургическом производстве на примере АО «Ульбинский металлургический завод»**

**Т.Ш. Идрисов<sup>1,2</sup> ✉, М.В. Коптелов<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup>АО «Ульбинский металлургический завод» АО «НАК «Казатомпром», г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup>Частное учреждение по информационно-аналитическому обеспечению

«Ситуационно-кризисный Центр Росатома», г. Москва, Российская Федерация

✉ idrisovts@ulba.kz

**Аннотация.** В статье представлен количественный анализ динамики производственного травматизма и экономической эффективности мероприятий промышленной безопасности в бериллиевом производстве АО «Ульбинский металлургический завод» (АО «УМЗ») за 2020-2024 годы. Исследование основано на данных внутренней отчетности предприятия, включающих показатель LTIFR, число несчастных случаев с потерей трудоспособности, годовые затраты на охрану труда и промышленную безопасность, а также ведущие показатели состояния барьерной системы. Установлено, что в 2020 г. LTIFR составил 0,18, в 2021 г. – 0,28 (максимальное значение за период), после чего в 2022-2024 гг. показатель стабильно равен 0,00. Параллельно объем затрат на охрану труда увеличился с 1 382 325 тыс. тг (2020 г.) и 1 608 726 тыс. тг (2021 г.) до 2 102 982 тыс. тг (2022 г.) и 2 814 728 тыс. тг (2023 г.), с последующей оптимизацией до 1 997 480 тыс. тг в 2024 году. Анализ показывает, что за четырехлетний интервал достигнуто снижение LTIFR с 0,28 до 0,00 и его удержание в течение трех последовательных лет. Экономическая оценка мероприятий по снижению риска выполнена на основе показателя ожидаемых годовых потерь (EAL). Приведенные затраты (PV(C)) составили около 25 млн тг, тогда как приведенный эффект предотвращенных потерь (PV(ΔEAL)) достиг 59 млн тг при горизонте расчета 10 лет и ставке дисконтирования 12 %. Коэффициент выгоды-затраты (BCR) превышает 2,0, что свидетельствует о положительной чистой приведенной стоимости реализованных мер. Анализ ведущих показателей показал рост охвата проверок критических контролей с 60 % до 90 %, увеличение охвата обучением с 85 % до 97 %, снижение доли несоответствий с 18 % до 9 %, сокращение среднего срока устранения нарушений более чем в два раза и рост числа сообщений о near-miss с 40 до 80 случаев в год. Полученные результаты подтверждают системный характер достигнутого эффекта и соответствие траектории «рост инвестиций – нулевой LTIFR – оптимизация затрат» принципу ALARP. Показано, что устойчивое удержание LTIFR на уровне 0,00 в течение 2022-2024 гг. связано с комплексом инженерных, организационных и поведенческих мер и сопровождается положительной экономической отдачей.

**Ключевые слова:** промышленная безопасность, LTIFR, охрана труда, ALARP, экономическая эффективность, EAL, барьерная модель риска

Для цитирования: Идрисов Т.Ш., Коптелов М.В. Устойчивое достижение нулевого LTIFR и экономическая эффективность мер промышленной безопасности в металлургическом производстве на примере АО «Ульбинский металлургический завод». *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(2):116-126. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-11>

**For citation:** Idrisov T.Sh., Koptelov M.V. Sustained zero LTIFR and the economic effectiveness of industrial safety measures in metallurgical production at Ulba metallurgical plant JSC. *Nuclear Safety*. 2026;16(2):116-126. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-02-11>

## Sustained zero LTIFR and the economic effectiveness of industrial safety measures in metallurgical production at Ulba metallurgical plant JSC

Tair Sh. Idrisov<sup>1,2</sup> ✉, Matvey V. Koptelov<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Ulba Metallurgical Plant JSC, Kazatomprom JSC, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

<sup>2</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup>Situational and Crisis Centre of State Corporation Rosatom, Moscow, Russian Federation

✉ idrisovts@ulba.kz

**Abstract.** This paper presents a quantitative analysis of occupational injury dynamics and the economic effectiveness of industrial safety measures in the Ulba Metallurgical Plant JSC (UMP JSC) for the period 2020-2024. The study is based on internal corporate reporting data, including the Lost Time Injury Frequency Rate (LTIFR), the number of lost-time injuries, annual expenditures on occupational and industrial safety, and leading indicators reflecting the condition of the safety barrier system. The results show that LTIFR amounted to 0.18 in 2020 and increased to 0.28 in 2021 (the maximum value within the analyzed period), after which it declined to 0.00 and remained at this level throughout 2022-2024. In parallel, total safety expenditures increased from 1,382,325 thousand KZT in 2020 and 1,608,726 thousand KZT in 2021 to 2,102,982 thousand KZT in 2022 and 2,814,728 thousand KZT in 2023, followed by optimization to 1,997,480 thousand KZT in 2024. The data demonstrate a reduction in LTIFR from 0.28 to 0.00 over a four-year interval and its sustained maintenance for three consecutive years. The economic evaluation of risk reduction measures was performed using the Expected Annual Loss (EAL) approach. The present value of costs (PV(C)) is approximately 25 million KZT, while the present value of prevented losses (PV( $\Delta$ EAL)) reaches 59 million KZT over a 10-year horizon at a 12% discount rate. The benefit-cost ratio (BCR) exceeded 2.0, indicating a positive net present value of the implemented safety measures. Leading indicators showed significant improvements: coverage of critical control inspections increased from 60% to 90%, training coverage rose from 85% to 97%, the proportion of non-conformities decreased from 18% to 9%, the average time required for corrective actions was reduced by more than half, and near-miss reporting increased from 40 to 80 cases per year. The findings confirm the systemic nature of the achieved effect and demonstrate that the trajectory «increased safety investment – zero LTIFR – expenditure optimization» is consistent with the ALARP principle. Sustained zero LTIFR in 2022-2024 is associated with a combination of engineering, organizational, and behavioral measures and is accompanied by a positive economic return on safety investments.

**Keywords:** industrial safety, LTIFR, occupational health and safety, ALARP, economic efficiency, Expected Annual Loss, safety barrier model

### Введение

Металлургические производства относятся к категории технологически сложных и потенциально опасных систем, в которых совмещаются высокотемпературные процессы, механические нагрузки, обращение с опасными веществами и работа оборудования повышенной энергоёмкости. В подобных условиях безопасность труда выступает не изолированным функциональным направлением, а ключевым элементом общей производственной устойчивости. Нарушение технологической дисциплины или отказ защитных систем способен привести не только к травматизму, но и к значительным экономическим потерям, простоям оборудования и репутационным рискам.

Современные концепции управления промышленной безопасностью исходят из того, что предотвращение тяжелых событий требует системного контроля критических барьеров, а не только реагирования

на уже произошедшие инциденты. Переход от анализа последствий к управлению вероятностью сценариев высокой тяжести отражен в международных практиках в области охраны труда и процессной безопасности, где акцент делается на идентификацию опасных сценариев и поддержание защитных мер в работоспособном состоянии [1,2,3]. В рамках барьерной модели риск рассматривается как функция вероятности отказа защитных механизмов, что делает актуальным анализ их устойчивости во времени.

Особую значимость подобный подход приобретает для предприятий, участвующих в обеспечении атомной отрасли материалами и компонентами. В данном контексте промышленная безопасность рассматривается как элемент общей культуры надежности и риск-ориентированного управления. Одним из таких предприятий является АО «Ульбинский металлургический завод»

(далее – АО «УМЗ»). Производственные процессы на АО «УМЗ» характеризуются сочетанием термических, механических и токсикологических факторов, что предъявляет повышенные требования к инженерным и организационным мерам защиты.

Специфика деятельности АО «УМЗ» предполагает использование комплекса инженерных барьеров (системы аспирации, локальные укрытия, блокировки, средства герметизации), процедурных механизмов (допуск к работам повышенной опасности, ЛOTO, контроль подрядчиков) и элементов поведенческой культуры безопасности. Международные исследования показывают, что устойчивое снижение риска достигается при одновременном развитии технических решений, управленческих процедур и вовлеченности персонала в выявление опасных условий [4,5,6].

Традиционно оценка результативности системы охраны труда строится на анализе запаздывающих показателей, прежде всего частоты травм с потерей трудоспособности (LTIFR). Однако в условиях длительного отсутствия несчастных случаев возникает методическая проблема: нулевые значения LTIFR не позволяют судить о состоянии критических контролей и устойчивости системы при изменении объема финансирования. Именно поэтому возникает необходимость комплексного анализа, включающего не только динамику травматизма, но и структуру затрат на безопасность, а также состояние ведущих показателей барьерной системы.

Анализ данных АО «УМЗ» за 2020-2024 гг. демонстрирует переход от ненулевых значений LTIFR к устойчивому нулевому уровню на фоне изменения объемов финансирования мероприятий по охране труда и промышленной безопасности. При этом в 2024 г. наблюдается оптимизация затрат при сохранении нулевого травматизма, что ставит вопрос об экономической эффективности ранее реализованных мер и устойчивости достигнутого результата.

Для количественной оценки экономической целесообразности мероприятий в исследовании используется показатель ожидаемых годовых потерь (Expected Annual Loss,

EAL) и его изменение ( $\Delta EAL$ ), позволяющее выразить снижение риска в денежной форме. Сопоставление приведенных затрат жизненного цикла мероприятий с предотвращенными потерями обеспечивает инструмент для портфельного отбора решений на основе критериев NPV и BCR и позволяет интерпретировать снижение риска в рамках принципа ALARP как экономически обоснованный процесс [7].

Вместе с тем подтверждение устойчивости системы невозможно без анализа ведущих индикаторов, отражающих фактическое состояние барьеров. Изменение охвата проверок критических контролей, доли несоответствий, сроков их устранения, уровня подготовки персонала и активности регистрации near-miss позволяет оценить зрелость системы управления безопасностью в условиях отсутствия травматизма и выявить потенциальные зоны риска до наступления событий высокой тяжести [8,9].

Следовательно, исследование опирается на интеграцию трех взаимосвязанных аналитических блоков: динамики LTIFR и затрат, экономической оценки предотвращенных потерь через  $\Delta EAL$  и анализа ведущих показателей состояния барьерной системы.

Целью исследования является комплексная оценка устойчивости системы промышленной безопасности АО «УМЗ» в 2020-2024 гг. на основе сопоставления динамики травматизма, экономической эффективности мероприятий и изменения ведущих индикаторов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- проанализировать динамику LTIFR и числа несчастных случаев на АО «УМЗ» за 2020-2024 гг.;
- сопоставить изменения травматизма с объемами финансирования мероприятий по безопасности;
- выполнить экономическую оценку мероприятий на основе показателя  $\Delta EAL$  и анализа жизненного цикла затрат;
- оценить изменение ведущих показателей состояния критических контролей как индикатора устойчивости системы;

– интерпретировать полученные результаты с позиций принципа ALARP и риск-ориентированного бюджетирования.

Научная новизна исследования заключается в:

– интеграции анализа запаздывающих и ведущих показателей безопасности в единую методическую модель оценки устойчивости;

– количественной интерпретации принципа ALARP через сопоставление приведенных затрат и предотвращенных ожидаемых потерь;

– эмпирическом обосновании устойчивости нулевого LTIFR на АО «УМЗ» при переходе от фазы интенсивных инвестиций к фазе оптимизации расходов на безопасность.

### Материалы и методы исследований

Эмпирической базой исследования послужили данные внутренней отчетности по охране труда и промышленной безопасности АО «УМЗ» за период 2020-2024 гг.<sup>1</sup>. Использовались агрегированные статистические и финансовые показатели, отражающие как результативность системы безопасности, так и объем ресурсов, направленных на ее поддержание.

В рамках исследования анализировались три группы исходных данных:

– количество зарегистрированных несчастных случаев с потерей трудоспособности;

– показатель LTIFR (Lost Time Injury Frequency Rate), рассчитываемый как число травм с потерей трудоспособности на 1 млн отработанных человеко-часов;

– годовые затраты на охрану труда и промышленную безопасность, включающие капитальные вложения (CAPEX) и эксплуатационные расходы (OPEX) на мероприятия по снижению производственного риска.

Использование данной структуры данных позволило рассматривать промышленную безопасность в двух взаимосвязанных измерениях: социальном (фактическая травматичность персонала) и экономическом

(устойчивость поддержания управляемого уровня риска при заданном уровне финансирования).

Анализ проводился в три этапа. На первом этапе проводился анализ динамики показателей травматизма за 2020-2024 годы. В расчет принимались как абсолютные значения (количество несчастных случаев), так и нормированный показатель LTIFR. Применение LTIFR является методически обоснованным, поскольку он позволяет учитывать фактический объем отработанного времени и корректно сопоставлять периоды при изменении численности персонала и производственной загрузки [10].

Анализ динамики LTIFR и числа несчастных случаев лег в основу построения первого аналитического блока, отражающего сопоставимую динамику травматизма и затрат на безопасность. Подобный подход соответствует практике оценки результативности систем охраны труда с использованием запаздывающих индикаторов (lagging indicators) [11].

Дополнительно проводилось выделение характерных временных этапов:

– 2020-2021 гг. – период ненулевого LTIFR;

– 2022-2023 гг. – достижение нулевого травматизма при росте финансирования;

– 2024 г. – сохранение нулевого LTIFR при оптимизации затрат.

Выделение указанных фаз позволило перейти от простой констатации снижения травматизма к анализу устойчивости достигнутого результата.

На втором этапе осуществлялось сопоставление динамики травматизма с объемами финансирования мероприятий по охране труда и промышленной безопасности. В составе затрат учитывались:

– инженерные меры (аспирационные системы, локальные укрытия, модернизация грузоподъемного оборудования, системы блокировок и контроля доступа);

– организационные мероприятия (регламентация работ повышенной опасности, процедуры LOTO, аудит подрядчиков);

– поведенческие меры (обучение, инструктаж, контроль дисциплины).

<sup>1</sup> Производственная безопасность. АО «Ульбинский металлургический завод». – Ulba.kz. – 2025. – Режим доступа: <https://www.ulba.kz/ru/proizvodstvennaia-bezopasnost> (дата обращения: 25.02.2026).

Подобная детализация соответствует концепции управления критическими барьерами, согласно которой безопасность определяется не только наличием технических решений, но и устойчивостью организационных процедур.

В рамках исследования затраты на безопасность интерпретировались как инвестиции в предотвращение потенциальных потерь. Для количественной оценки экономической эффективности применялся показатель ожидаемых годовых потерь (Expected Annual Loss, EAL) и его изменение ( $\Delta EAL$ ), позволяющее выразить снижение риска в денежном эквиваленте.

Расчет осуществлялся по базовой формуле (1) [12]:

$$EAL = P \cdot L, \quad (1)$$

где  $P$  – годовая вероятность реализации опасного сценария;

$L$  – величина ущерба при его наступлении.

Для повышения воспроизводимости экономической оценки в исследовании использовался сценарный подход к определению ожидаемых годовых потерь. В качестве расчетных сценариев рассматривались наиболее значимые для высокоопасного металлургического производства события, способные привести к тяжелым последствиям: травмирование персонала при выполнении работ повышенной опасности, инциденты при грузоподъемных и стропальных операциях, отказ аспирационных или локальных защитных систем, нарушение процедур ЛОТО и допуска к работам, а также локальные пожароопасные или термические аварийные ситуации.

Годовая вероятность реализации сценария  $P$  определялась экспертно-аналитическим способом с учетом внутренних данных предприятия, характера выполняемых опасных операций, состояния инженерных и организационных барьеров, результатов проверок критических контролей, доли выявленных несоответствий и сроков их устранения. Для исходного состояния до реализации комплекса мероприятий значения  $P$  принимались в диапазоне  $0,010-0,020 \text{ год}^{-1}$ , что соответствует редким, но потенциально

тяжелым событиям. После внедрения инженерных, организационных и поведенческих мер остаточная вероятность по сценариям принималась в диапазоне  $0,004-0,008 \text{ год}^{-1}$ . Снижение вероятности связывалось с повышением охвата проверок критических контролей, усилением процедур ЛОТО, ростом охвата обучением и сокращением сроков устранения выявленных нарушений.

Величина ущерба  $L$  определялась как совокупность прямых и косвенных потерь, которые могли возникнуть при реализации соответствующего сценария. В расчет включались возможные компенсационные выплаты, расходы на расследование происшествия, восстановительные работы, ремонт оборудования, простой производственного участка, внеплановые проверки, дополнительные корректирующие мероприятия и репутационные последствия. Для рассмотренных сценариев величина ущерба принималась в диапазоне  $85-130$  млн тг в зависимости от тяжести события и ожидаемой продолжительности простоя.

Расчет выполнялся по каждому сценарию отдельно. В частности, для сценария травмирования персонала при работах повышенной опасности исходная вероятность принималась на уровне  $P_1 = 0,020 \text{ год}^{-1}$ , остаточная вероятность после реализации мер  $P_2 = 0,008 \text{ год}^{-1}$ , а величина ущерба  $L = 85$  млн тг. Для инцидента при грузоподъемных и стропальных операциях использовались значения  $P_1 = 0,015 \text{ год}^{-1}$ ,  $P_2 = 0,006 \text{ год}^{-1}$ ,  $L = 110$  млн тг. Для отказа аспирационной или локальной защитной системы  $P_1 = 0,018 \text{ год}^{-1}$ ,  $P_2 = 0,007 \text{ год}^{-1}$ ,  $L = 95$  млн тг. Для нарушения процедур ЛОТО и допуска к работам  $P_1 = 0,012 \text{ год}^{-1}$ ,  $P_2 = 0,004 \text{ год}^{-1}$ ,  $L = 130$  млн тг. Для локальной пожароопасной или термической аварийной ситуации  $P_1 = 0,010 \text{ год}^{-1}$ ,  $P_2 = 0,004 \text{ год}^{-1}$ ,  $L = 115$  млн тг.

Следовательно, показатель EAL рассматривался как денежная оценка ожидаемого ущерба по конкретным сценариям тяжелых производственных инцидентов, а не как обобщенная или условная величина. Полученные по отдельным сценариям значения ожидаемых годовых потерь суммировались, что позволяло определить совокупный уро-

вень риска до и после реализации мероприятий.

Изменение показателя  $\Delta EAL$  определялось как разница между ожидаемыми потерями до и после внедрения мероприятия. Для сопоставления затрат и эффекта применялось дисконтирование денежных потоков на горизонте  $T$  лет при заданной ставке  $r$ , что позволило определить приведенные затраты  $PV(C)$ , приведенный эффект  $PV(\Delta EAL)$ , а также интегральные показатели NPV и BCR. Полученные результаты легли в основу второго аналитического блока, отражающего сопоставление приведенных затрат и предотвращенных потерь.

С учетом того, что нулевые значения LTIFR не позволяют оценить фактическое состояние защитных механизмов, на третьем этапе проводился анализ ведущих показателей (leading indicators), характеризующих работоспособность критических контролей.

В анализ включались:

- охват проверок критических контролей;
- доля выявленных несоответствий;
- средний срок устранения нарушений;
- охват персонала обучением по работам повышенной опасности;
- количество сообщений о near-miss и потенциально опасных условиях.

Использование ведущих индикаторов соответствует современным подходам к оценке устойчивости систем безопасности, позволяющим выявлять тенденции до реализации инцидента. Сопоставление значений «до» и «после» реализации комплекса мер представлено в третьем аналитическом блоке.

В совокупности примененная методика позволила:

- оценить динамику травматизма и ее связь с объемом финансирования;
- количественно обосновать экономическую эффективность мероприятий через показатель  $\Delta EAL$ ;
- проанализировать устойчивость барьерной системы на основе ведущих индикаторов;
- определить, носит ли достигнутый нулевой уровень LTIFR случайный характер либо является результатом системного управления риском в АО «УМЗ».

## Результаты и их обсуждение

Анализ данных АО «УМЗ» за 2020-2024 гг. свидетельствует о поэтапной трансформации системы промышленной безопасности от состояния управляемого, но присутствующего риска к устойчивому нулевому уровню травматизма.

В 2020 г. показатель LTIFR составлял 0,18 случая на 1 млн отработанных человеко-часов. В 2021 г. наблюдался рост данного показателя до 0,28, что является максимальным значением за рассматриваемый период. Именно поэтому, в первые два года анализируемого интервала предприятие функционировало в режиме остаточного производственного риска.

Начиная с 2022 г. ситуация принципиально меняется: в 2022, 2023 и 2024 гг. показатель LTIFR принимает значение 0,00 (рис. 1). Достижение нулевой частоты травм с потерей трудоспособности и ее последовательное удержание на протяжении трех лет в условиях высокоопасного бериллиевого производства не может быть объяснено исключительно статистическими колебаниями. Подобная динамика, как правило, отражает системные изменения в управлении критическими операциями и барьерной архитектуре производства.

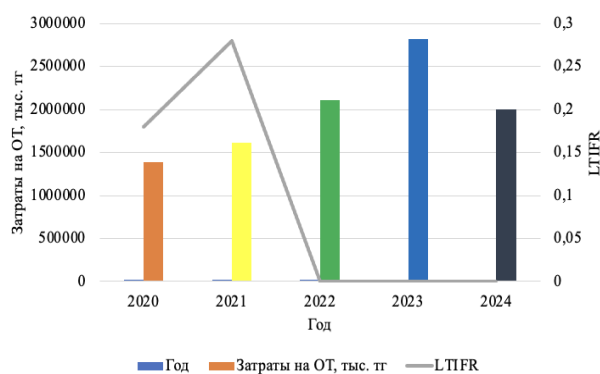


Рисунок 1. Сопоставимая динамика затрат и LTIFR за 2020-2024 гг.

Figure 1. Comparable dynamics of costs and LTIFR for 2020-2024

Параллельный анализ финансовых показателей демонстрирует четкую временную взаимосвязь между уровнем инвестиций в безопасность и динамикой травматизма.

В 2020 г. затраты на охрану труда и промышленную безопасность составили 1 382 325 тыс. руб., в 2021 г. – 1 608 726 тыс. руб.

Начиная с 2022 г. фиксируется резкое увеличение финансирования: до 2 102 982 тыс. тг в 2022 г. и до 2 814 728 тыс. тг в 2023 г. В 2024 г. затраты сохраняются на высоком уровне (1 997 480 тыс. тг), однако ниже пиковых значений 2023 г.

Сопоставление показателей позволяет выделить три этапа.

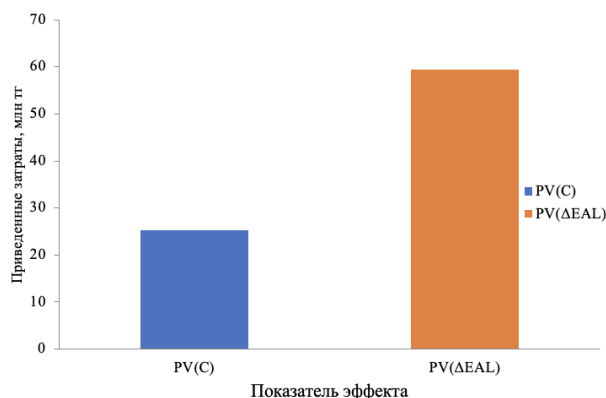
Первый этап (2020-2021 гг.) – период остаточного риска. LTIFR сохраняется на уровне 0,18-0,28 при умеренном уровне финансирования (до 1,6 млрд тг). Система безопасности функционирует в рамках нормативных требований, однако сохраняется вероятность реализации тяжелых сценариев.

Второй этап (2022-2023 гг.) – фаза интенсивного усиления барьеров. На фоне роста затрат более чем на 1 млрд тг по сравнению с 2020 г. достигается нулевой LTIFR. Данный период характеризуется максимальной инвестиционной активностью в инженерные и организационные меры защиты. С инженерной точки зрения это может включать модернизацию аспирационных систем, экранирование опасных зон, повышение надежности грузоподъемного оборудования, усиление процедур LOTO и контроля работ повышенной опасности.

Третий этап (2024 г.) – этап удержания результата. При снижении затрат относительно пиковых значений 2023 г. предприятие сохраняет нулевой уровень LTIFR. Это указывает на переход от режима капиталоемкого «наращивания» барьеров к режиму сопровождения и поддержания уже внедренной системы.

Такая динамика соответствует инженерной логике жизненного цикла барьеров: первоначальные капитальные вложения формируют устойчивую структуру защиты, после чего поддержание уровня безопасности требует преимущественно эксплуатационных расходов.

Дополнительное подтверждение инвестиционного характера затрат представлено на рисунке 2, где сопоставлены приведенные затраты жизненного цикла мероприятия (PV(C)) и приведенный эффект в виде предотвращенных ожидаемых потерь (PV(ΔEAL)) за 10-летний горизонт при ставке дисконтирования 12 %.



**Рисунок 2.** Приведенные затраты и предотвращенные потери (ΔEAL)

**Figure 2.** The costs incurred and losses prevented (ΔEAL)

Согласно расчетам, приведенные затраты составляют около 25 млн тг, тогда как приведенный экономический эффект достигает порядка 59 млн тг. Соотношение  $PV(\Delta EAL) / PV(C)$  превышает 2, что свидетельствует о положительной чистой приведенной стоимости ( $NPV > 0$ ) и коэффициенте выгоды-затраты ( $BCR > 1$ ).

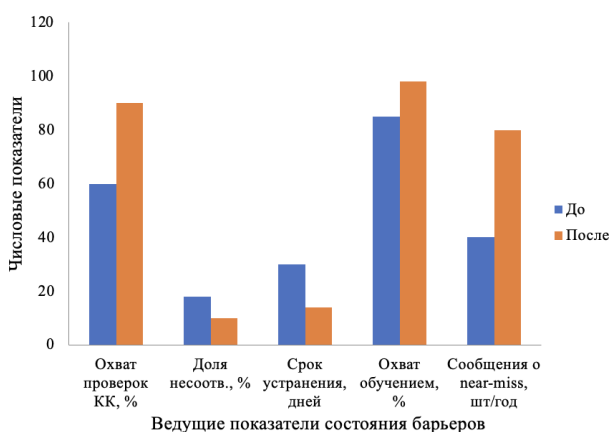
Указанные значения были получены на основе сценарного расчета ожидаемых годовых потерь, включающего риски травмирования персонала при выполнении работ повышенной опасности, инциденты при грузоподъемных и стропальных операциях, отказы аспирационных и локальных защитных систем, нарушения процедур LOTO и допуска к работам, а также локальные пожароопасные и термические аварийные ситуации. Для каждого сценария учитывались расчетная годовая вероятность до и после реализации мероприятий, а также оценочная величина возможного ущерба. Это позволило связать экономический эффект не только с общей динамикой LTIFR, но и со снижением вероятности конкретных опасных сценариев.

Полученные результаты подтверждают, что инвестиции в безопасность в данном случае не являются исключительно социально-ориентированными расходами, а имеют прямую экономическую отдачу. Снижение вероятности тяжелых инцидентов приводит к предотвращению потенциально более значительных потерь, связанных с простоями оборудования, компенсацион-

ными выплатами и репутационными рисками.

Таким образом, рост затрат в 2022-2023 гг. может рассматриваться как экономически обоснованный этап формирования устойчивой барьерной структуры.

Для оценки устойчивости достигнутого результата был проанализирован блок ведущих индикаторов (рис. 3).



**Рисунок 3.** Изменение ведущих показателей состояния барьеров (до/после)

**Figure 3.** Change in key indicators of barrier condition (before/after)

По сравнению с исходным состоянием наблюдаются следующие изменения:

- охват проверок критических контролей увеличился примерно с 60 % до 90 %;
- доля несоответствий снизилась с 18 % до 9 %;
- средний срок устранения нарушений сократился более чем вдвое;
- охват обучением вырос с 85 % до 97 %;
- количество сообщений о near-miss увеличилось с 40 до 80 в год.

Рост числа сообщений о потенциально опасных ситуациях при одновременном снижении травматизма следует интерпретировать не как ухудшение ситуации, а как признак зрелости культуры безопасности и вовлеченности персонала. Ведущие индикаторы демонстрируют усиление контроля и управляемости барьерной системы, что подтверждает системный характер достигнутого нулевого LTIFR.

Комплексный анализ трех блоков данных позволяет сделать вывод, что снижение LTIFR до нулевого уровня в 2022 г. не является случайным. Оно совпадает по времени с фазой активного усиления инженерных и

организационных мер, а последующее удержание результата в 2024 г. сопровождается стабилизацией ведущих показателей и положительным экономическим эффектом.

Данная динамика соответствует принципу ALARP: риск снижен до практически нулевого уровня, при котором дальнейшее уменьшение потребовало бы несоразмерного роста затрат по сравнению с дополнительным выигрышем в безопасности.

Следует отметить ряд ограничений.

Во-первых, анализ базируется на агрегированных данных без детализации по видам происшествий и подразделениям.

Во-вторых, в исследование не включены показатели легких травм и микротравматизма.

В-третьих, экономическая оценка основана на расчетных значениях вероятности реализации сценариев и экспертно-аналитической оценке возможного ущерба. Поэтому полученные значения PV(ΔEAL), NPV и BCR следует рассматривать как обоснованную сценарную оценку экономического эффекта, а не как точное прогнозное значение фактических будущих потерь. Кроме того, модель не учитывает возможные экстремальные события низкой частоты.

Тем не менее совокупность объективных производственных, финансовых и организационных показателей позволяет утверждать, что в АО «УМЗ» в 2020-2024 гг. реализована системная программа снижения производственного риска, обеспечившая устойчивое удержание LTIFR на уровне 0,00 при экономически обоснованном уровне инвестиций.

### Заключение

По результатам проведенного исследования установлена устойчивая взаимосвязь между динамикой инвестиций в охрану труда и промышленную безопасность и снижением показателя LTIFR в АО «УМЗ» в 2020-2024 гг. Показано, что рост целевых затрат в 2022-2023 гг. сопровождался достижением нулевого уровня травматизма, а последующая оптимизация расходов в 2024 г. не привела к ухудшению показателей безопасности. За рассматриваемый период предприятие перешло от состояния остаточного риска (LTIFR 0,18-0,28 в 2020-2021 гг.) к устойчивому нулевому значению LTIFR в 2022-

2024 годах.

Комплексный анализ трех блоков данных подтвердил, что зафиксированное снижение травматизма носит системный характер. Сопоставление динамики LTIFR и затрат показало временную согласованность инвестиционной активности и улучшения показателей безопасности. Экономическая оценка мероприятий на основе показателя ΔEAL, выполненная с использованием сценарного подхода к оценке вероятности и ущерба тяжелых производственных инцидентов, продемонстрировала превышение приведенного эффекта над приведенными затратами, что свидетельствует о положительной экономической отдаче реализованных мер. Анализ ведущих индикаторов состояния барьеров подтвердил повышение управляемости критических контролей, рост охвата проверок и обучения, снижение доли несоответствий и увеличение регистрации потенциально опасных ситуаций.

Ключевыми факторами достигнутого результата выступили:

- модернизация и усиление инженерных барьеров (аспирационные системы, локальные укрытия, блокировки, повышение надежности грузоподъемных механизмов);
- повышение управляемости работ повышенной опасности (горячие, газоопасные и стропально-грузоподъемные операции, процедуры LOTO);
- развитие организационной дисциплины и культуры безопасности персонала;
- переход к системному мониторингу ведущих индикаторов состояния барьерной структуры.

Сохранение нулевого уровня LTIFR при умеренном снижении затрат в 2024 г. свидетельствует о переходе от фазы капиталоемкого усиления системы к фазе сопровождения и контроля. Данная траектория соответствует принципу ALARP: основная часть существенного риска была снижена в период активных инвестиций, после чего поддержание достигнутого уровня безопасности обеспечивается за счет эксплуатационного контроля и дисциплины процедур без необходимости постоянного наращивания затрат.

С практической точки зрения, полученные результаты имеют прикладное значение

для предприятий, входящих в контур обеспечения атомной отрасли. Продемонстрирована возможность длительного удержания нулевого LTIFR при переходе от фазы интенсивного финансирования к фазе оптимизации расходов, что подтверждает экономическую обоснованность риск-ориентированного подхода к управлению промышленной безопасностью. В данном случае инвестиции в безопасность проявляют двойной эффект – снижение социального риска и предотвращение потенциальных экономических потерь.

В качестве направлений дальнейшего развития системы безопасности целесообразно выделить:

- расширение цифрового мониторинга состояния инженерных барьеров и соблюдения процедур работ повышенной опасности с использованием инструментов предиктивной аналитики;
- интеграцию санитарно-гигиенических показателей (концентрации аэрозолей бериллия, эффективность фильтрации) в единую систему оценки производственного риска;
- развитие программ таргетированного обучения с учетом категории риска и участия персонала в критических операциях;
- проведение регулярных независимых оценок эффективности барьерной системы;
- совершенствование экономической модели портфельного отбора мероприятий на основе сопоставления «затраты – предотвращенный ущерб».

Перспективы дальнейших исследований связаны с построением прогностических моделей динамики LTIFR и ведущих индикаторов, а также с разработкой методик оценки оптимального уровня инвестиций в безопасность для высокоопасных металлургических производств с бериллиевым переделом.

Результаты исследования подтверждают, что в АО «УМЗ» промышленная безопасность функционирует как управляемый элемент производственной системы, где снижение риска достигается посредством сбалансированного сочетания инженерных, организационных и экономически обоснованных решений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ильенко Е.П. Экономическая оценка системы управления охраной труда и промышленной безопасностью на горнодобывающих предприятиях. Дисс. на соиск. уч. ст. к. э. н. С-Пб-2017., 2017. 160 с. [https://spmi.ru/sites/default/files/imci\\_images/sciens/dissertacii/2017/2017-3/ilenko\\_dissertaciya\\_nasayt\\_dok.pdf](https://spmi.ru/sites/default/files/imci_images/sciens/dissertacii/2017/2017-3/ilenko_dissertaciya_nasayt_dok.pdf) (дата обращения: 18.02.2026).
1. Ilyenko E.P. (2017). Economic assessment of the occupational health and safety management system at mining enterprises. Dissertation for the degree of Candidate of Economic Sciences. St. Petersburg, 2017. 160 p. (In Russ.). Available at: [https://spmi.ru/sites/default/files/imci\\_images/sciens/dissertacii/2017/2017-3/ilenko\\_dissertaciya\\_nasayt\\_dok.pdf](https://spmi.ru/sites/default/files/imci_images/sciens/dissertacii/2017/2017-3/ilenko_dissertaciya_nasayt_dok.pdf) (accessed: 18.02.2026).
2. Ab Rahim M.S., Reniers G., Yang M., Siwayanan P. Integrating Process Safety and Process Security Risk Management: Practitioner Insights for a Resilience-Oriented Framework. *Processes*. 2025;13(2):392. <https://doi.org/10.3390/pr13020392> (accessed: 19.02.2026).
3. Stefana E., Ustolin F., Paltrinieri N. IMPROSAFETY: A risk-based framework to integrate occupational and process safety. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2022;75:104698. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104698> (accessed: 19.02.2026).
4. Hale A.R., Guldenmund F.W., van Loenhout P.L., Oh J.I.H. Evaluating safety management and culture interventions to improve safety: Effective intervention strategies. *Safety science*. 2010;48(8):1026-1035. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.05.006> (accessed: 19.02.2026).
5. Markert F., Duijm N.J., Thommesen J. Modelling of safety barriers including human and organisational factors to improve process safety. *Chemical engineering transactions*. 2013;31:283-288. <https://doi.org/10.3303/CET1331048> (accessed: 20.02.2026).
6. Theophilus S.C., Nwankwo C.D., Acquah-Andoh E., Bassey E., Umoren U. Integrating human factors (HF) into a process safety management system (PSMS). *Process safety progress*. 2017;37(1):67-85. <https://doi.org/10.1002/prs.11909> (accessed: 20.02.2026).
7. Abrahamsen T.A.E. On the use of cost-benefit analysis in ALARP processes. *International Journal of Performance Engineering*, 2007;3(3):345-353. Available at: <https://www.ijpe-online.com/EN/10.23940/ijpe.07.3.p345.mag> (accessed: 25.02.2026).
8. Reiman T., Pietikäinen E. Leading indicators of system safety – Monitoring and driving the organizational safety potential. *Safety science*. 2012;50(10):1993-2000. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.07.015> (accessed: 25.02.2026).
9. Phimister J.R., Oktem U., Kleindorfer P.R., Kunreuther H. Near-miss incident management in the chemical process industry. *Risk Analysis: An International Journal*. 2003;23(3):445-459. <https://doi.org/10.1111/1539-6924.00326> (accessed: 25.02.2026).
10. Sundström E., Nygren M. Safety Initiatives in Support of Safety Culture Development: Examples from Four Mining Organisations. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2023;40:1007-1020. <https://doi.org/10.1007/s42461-023-00809-y> (accessed: 25.02.2026).
11. Ali M. X.M., Arifin K., Abas A., Ahmad M.A., Khairil M., Cyio M.B., Samad M.A., Lampe I., Mahfudz M., Ali M.N. Systematic Literature Review on Indicators Use in Safety Management Practices among Utility Industries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(10):6198. <https://doi.org/10.3390/ijerph19106198> (accessed: 26.02.2026).
12. Kaplan S., Garrick B.J. On the quantitative definition of risk. *Risk analysis*. 1981;1(1):11-27. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1981.tb01350.x> (accessed: 26.02.2026).

## ВКЛАД АВТОРОВ:

**Идрисов Т.Ш.** – изучение теоретических источников по проблеме для формирования методического аппарата предметной области исследования, написание и вычитка работы;

**Коптелов М.В.** – концепция и качественная разработка исследования, внесение корректив и уточнений в работу.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

## AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Idrisov T.Sh.** – studying theoretical sources on the subject to develop a methodological framework for the research area, and drafting and editing the paper;

**Koptelov M.V.** – the design and high-quality development of the research, making corrections and clarifications to the work.

## FUNDING:

The study had no external funding.

## CONFLICT OF INTEREST:

There is no conflict of interest.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Таир Шингысканович Идрисов**, главный технический руководитель по охране труда и охране окружающей среды Бериллиевого производства АО «Ульбинский металлургический завод» АО «НАК «Казатомпром», г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; магистр, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: idrisovts@ulba.kz

**Матвей Викторович Коптелов**, кандидат экономических наук, Н начальник информационно-аналитического центра ОСЧС, Частное учреждение по информационно-аналитическому обеспечению «Ситуационно-кризисный Центр Росатома», г. Москва, Российская Федерация; доцент кафедры № 71 Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: MKoptelov@skc.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Tair Sh. Idrisov**, Chief Technical Officer of Labor and Environmental Protection, Berillyevo Production, Ulba Metallurgical Plant JSC, Kazatomprom JSC, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; Master's Degree, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

email: idrisovts@ulba.kz

**Matvey V. Koptelov**, Can. Sci. (Econ.), Head of the Information and Analytical Centre, Situational and Crisis Centre of State Corporation Rosatom, Moscow, Russian Federation; Associate Professor of Department №71, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

e-mail: MKoptelov@skc.ru

Поступила в редакцию / Received 27.02.2026

После доработки / Revision 13.05.2026

Принята к публикации / Accepted 19.05.2026

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Алексеев Д.В.	5
Анисур С.К.Рахман	67
Аркадов Г.В.	77
Башкиров Г.А.	57
Булахтин К.В.	27
Бунамес Н.В.	106
Бурдаков Е.С.	41
Бурдаков С.М.	41
Валеев Р.Ш.	27
Данилов А.Д.	57
Зайкин И.И.	27
Заяров Ю.В.	41
Идрисов Т.Ш.	116
Карандеева Н.В.	57
Карпенко Н.А.	27
Колычев В.Д.	5
Коптелов М.В.	116
Лапкис А.А.	16
Лесных Н.Ю.	91
Макарова М.В.	91
Подрезов Н.Н.	41
Рясный С.И.	27
Савельева Н.К.	91
Семенов А.А.	49
Серко А.О.	16
Слепов М.Т.	77
Созинова А.А.	91
Субботин А.М.	49
Ухалина И.А.	106
Щугорев А.В.	27

## AUTHOR INDEX

Alekseenko D.V.	5
Anisur S.K. Rahman	67
Arkadov G.V.	77
Bashkirov G.A.	57
Bulakhtin K.V.	27
Bunames N.V.	106
Burdakov E.S.	41
Burdakov S.M.	41
Danilov A.D.	57
Idrisov T.Sh.	116
Karandeeva N.V.	57
Karpenko N.A.	27
Kolychev V.D.	5
Koptelov M.V.	116
Lapkis A.A.	16
Lesnykh N.Yu.	91
Makarova M.V.	91
Podrezov N.N.	41
Ryasny S.I.	27
Savelyeva N.K.	91
Semenov A.A.	49
Serko A.O.	16
Shchugorev A.V.	27
Slepov M.T.	77
Sozinova A.A.	91
Subbotin A.M.	49
Ukhalina I.A.	106
Valeev R.Sh.	27
Zayarov Yu.V.	41
Zaykin I.I.	27

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

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:

- название на русском и английском языках;
- инициалы и фамилия авторов на русском и английском языках;
- аффилиация каждого автора на русском и английском языках;
- структурированная по IMRAD аннотация (200-270 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);
- вклад в представленную научную работу каждого автора;
- 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 2700 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=193511> 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> – и предоставить следующие материалы по электронной почте [oni-viti@mephi.ru](mailto: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 с обезличенной статьей в формате pdf для слепого рецензирования;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати.

## ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Губеладзе О.А., Губеладзе А.Р. Оценка технического состояния малогабаритной ядерной энергетической установки после опрокидывания транспортного агрегата. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(4):19–26. EDN: GIAKOU. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-02>

Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Technical condition assessment of a small-sized nuclear power plant after transportation unit overturning. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):19–26. (In Russ.). EDN: GIAKOU <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-02>

2. Поваров В.П., Росновский С.В., Мельников Э.С., Литовченко М.Н. и др. Исследование воздействия физико-химических факторов при коррекционной обработке дебалансных вод АЭС с целью обеспечения соответствия кондиционированных радиоактивных отходов нормативным требованиям. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(4):5–18. EDN: FNSFJI. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-01>

Povarov V.P., Rosnovskiy S.V., Melnikov E.S., Litovchenko M.N. et al. Investigation of the impact of the physical and chemical factors during correction treatment of NPP unbalance water to ensure compliance of conditioned radioactive waste with regulatory requirements. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):5–18. (In Russ.). EDN: FNSFJI. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-01>

3. Припачкин Д. Физико-химические основы аэрозольной безопасности на предприятиях ядерного топливного цикла. Автореферат диссертации ... доктора физико-математических наук (1.4.4 – Физическая химия). Москва: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2024. 48 с. Режим доступа: <https://openrepository.mephi.ru/entities/publication/266af205-29ad-4d12-b7ab-e94c9f2916e1> (дата обращения: 20.03.2025).

Pripachkin D. Physico-chemical bases of aerosol safety at nuclear fuel cycle enterprises. Abstract of dissertation ... Doctor of physical and mathematical sciences (1.4.4 - Physical chemistry). Moscow: Institute for Problems of Safe Development of Nuclear Power Engineering RAS, 2024. 48 с. Available at: <https://openrepository.mephi.ru/entities/publication/266af205-29ad-4d12-b7ab-e94c9f2916e1> (accessed: 20.03.2025).

4. Северцев Н.А., Юрков Н.К. Безопасность динамических систем на этапах жизненного цикла. Монография. Пенза: Изд-во ПГУ, 2023. 568 с. Режим доступа: <https://elibr.pnzgu.ru/library/1699606807> (дата обращения: 20.03.2025).

Severtsev N.A., Yurkov N.K. Safety of dynamic systems at the stages of life cycle. Monograph. Penza: Publishing house of Penza State University, 2023. 568 p. (In Russ.). Available at: <https://elibr.pnzgu.ru/library/1699606807> (accessed: 20.03.2025).

5. Файков Д.Ю., Байдаров Д.Ю. Диверсификация в атомной отрасли: современное состояние, особенности, перспективы. *Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России*. 2021;2:41–48. Режим доступа: (дата обращения: 20.03.2025).

Faykov D.Yu., Baidarov D.Yu. Diversification in the nuclear industry: current state, features, prospects. *Scientific bulletin of the military-industrial complex of Russia*. 2021;2:41–48. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46289137> (accessed: 20.03.2025).

6. Бойкова Т.В., Кочнов Ю.О., Мясников С.В., Петрунин Н.В., Терашкевич С.С. Эксплуатационный контроль состояния металла корпусов растворных реакторов в НИЦ «Курчатовский институт». *Вопросы материаловедения*. 2022;(4(112)):191–198. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-112-4-191-198>

Boikova T.V., Kochnov Y.O., Myasnikov S.V., Petrunin N.V., Terashkevich S.S. Operational monitoring of the metal of solution pressure vessel reactors at NRC «Kurchatov institute». *Voprosy materialovedeniya*. 2022;4(112):191–198. (In Russ.). <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-112-4-191-198>

7. Камышев А.В., Пасманик Л.А., Ровинский В.Д., Гетман А.Ф., Губа С.В. Способ определения остаточных напряжений в металле шва сварных соединений трубопроводов (варианты). Патент RU 2711082 C1 Российская Федерация, МПК G01N 29/07 (2006.01). № 2019110165/28. Заявлен: 05.04.2019. Опубликовано: 15.01.2020. 6 с. Режим доступа: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2711082C1\\_20200115](https://yandex.ru/patents/doc/RU2711082C1_20200115) (дата обращения 20.03.2025).

Kamyshev A.V. Pasmanik L.A., Rovinskij V.D., Getman A.F., Guba S.V. Method for determination of residual stresses in weld metal welded joints of pipelines (versions). Patent Russia RU 2711082 C1: 15.01.2020. (In Russ.) Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2711082C1\\_20200115](https://yandex.ru/patents/doc/RU2711082C1_20200115) (accessed: 20.03.2025).

8. Appleton J.D., Kendall G.M. Gamma-radiation levels outdoors in Great Britain based on K, Th and U geochemical data. *Journal of environmental radioactivity*. 2022;271–272:106948. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106948>

Электронный адрес редакции журнала «Глобальная ядерная безопасность» – [oni-viti@mephi.ru](mailto:oni-viti@mephi.ru)  
Выпускающий редактор – Лобковская Надежда Ивановна, +79281883628, [NILobkovskaya@mephi.ru](mailto:NILobkovskaya@mephi.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:

- 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 (200-270 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);
  - contribution to the presented scientific work of each author;
- 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 2700 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=193511> 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> – and the following materials must be sent by email [oni-viti@mephi.ru](mailto: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. Balyabin A.I., Gerasimov S.I., Ladin D.A., Maskaykin S.A. et al. Study of mathematical models of elastoplastic materials. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):42–54. (In Russ.). EDN: ROFQTO. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-05>
2. Morgunova G.V., Khokhlov A.N. Place of Russian scientific journals on natural, exact, and technical sciences in the international rankings. *Science editor and publisher*. 2024;9(2):209–220. (In Russ.). <https://doi.org/10.24069/SEP-24-26>
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/10.1197/0739456X19827083>
4. Nikitin A.A., Rogozhkin S.V., Ogorodnikova O.V., Bogachev A.A. et al. Microstructure and mechanical properties of w-10cr-0.5y alloy under heavy ion irradiation. *Nuclear physics and engineering*. 2025;16(2):135–145. (In Russ.). EDN: QWXNZS. <https://doi.org/10.56304/S2079562924050336>
5. Polyandin A.D., Kudryashov N.A. Nonlinear schrödinger equation of general form: multifunctional model, reductions and exact solutions. *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI»*. 2025;14(1):24–36. (In Russ.). EDN: DXKPEC. <https://doi.org/10.26583/vestnik.2025.1.3>
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/10.1088/1942-6596/2131/5/052061>
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. Lapkis A.A., Tsykhler L.V., Nikiforov V.N., Egorova V.P. Analysis of calibration error of NPP shut-off valve electric drive. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):80-90. (In Russ.). EDN: TGXPIS. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-08>
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: 20.03.2025).
11. Kovalev N.V., Prokoshin A.M., Davydova P.V., Korolev V.A. Radiation characteristics of reactor grade platinum group metals. *Nuclear energy and technology*. 11(1):55–58. Available at: <https://nucet.pensoft.net/article/150529/list/18/> (accessed: 20.03.2025).
12. Surin V.I., Ivanyi M.V., Shcherbakov A.A., Shcherban A.A., Pavlichenko A.V., Tomilin S.A., Zhidkov M.E., Gook A.E. Gradient method of structural heterogeneity identification in electrical inspection of equipment, products and materials. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):34–41. (In Russ.). EDN: QWREXO. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-04>
13. Arkadov G.V., Slepov M.T. Neutron noise control techniques for VVER core. *Nuclear safety*. 2024;14(4):55–70. (In Russ.). EDN: SAGHCF. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-06>

*Nuclear Safety* – [oni-viti@mephi.ru](mailto:oni-viti@mephi.ru)

Executive Editor – Nadezhda I. Lobkovskaya, +79281883628, [NILobkovskaya@mephi.ru](mailto:NILobkovskaya@mephi.ru)