

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Глобальная ядерная безопасность

(научно-практический журнал)

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

Том 15, № 3 (56), 2025

Журнал включен в перечень ВАК РФ (1064)

Научные специальности:

- 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 Канатинович Скаков, доктор физ.-мат. наук, профессор, Восточно-Казахстанский университет, Казахстан

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

Лю Дамин, профессор, Китайский институт ядерной энергетики, Китай

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

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

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

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

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

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

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

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

Сергей Эдуардович Гюк, 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 Зверовицков, доктор техн. наук, доцент, Пензенский государственный университет, Российская Федерация

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

Мария Владимировна Головкина, 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 Юрьевна 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»
Адрес редакции:	115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31
Типография:	ИПС ВИТИ НИЯУ МИФИ, 347360, Россия, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94
Сайт:	https://glonucsec.elpub.ru
Тираж:	300 экз.
Цена:	Свободная
Подписной индекс:	10647 (объединенный каталог «Пресса России»)
Выход в свет:	24.09.2025



Москва

National Research Nuclear University MEPhI

Nuclear Safety

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

Vol. 15, No. 3, 2025

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Maria 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
Quarterly

Founder and Publisher:

Editorial address:

Printing house:

Website:

The circulation is:

The price:

The subscription index is:

Published on:

Reg. № FS77-47155, November, 3 2011

National Research Nuclear University MEPhI

Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409, Russian Federation

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

<https://glonucsec.elpub.ru>

300 copies

Is free

10647 in the catalogue «Press of Russia»

24.09.2025



Moscow

СОДЕРЖАНИЕ

Том 15, № 3 (56), 2025

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Внедрение системы автоматического непрерывного мониторинга сбросных вод на АЭС «Аккую»	
<i>И.И. Зайкин, Р.Ш. Валеев, А.С. Войтенко, С.И. Рясный</i>	6
Минимизация дозовых затрат персонала с использованием маршрутной оптимизации	
<i>О.Л. Ташлыков, А.Н. Сесекин, Д.А. Татарских, Д.И. Завадский</i>	14

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Применение кода ОрепМС для бенчмарка ВВЭР-1000 со смешанной загрузкой уранового и МОКС-топлива	
<i>Д.А. Плотников, В.И. Романенко, Д.А. Соловьев, В.Г. Зимин, И.А. Молев, В.Н. Кудратов, С.В. Ивахин, Б. Джарум</i>	26
Автоматизация диагностики оборудования АС с помощью искусственных нейронных сетей	
<i>А.Ю. Ченцова, Н.Ю. Шапошникова, И.А. Микишин, Е.В. Воробьев</i>	36

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Опыт проведения реагентной очистки оросителя для повышения охлаждающей способности и эффективности работы башенной испарительной градирни	
<i>В.П. Поваров, В.В. Бакулин, Н.В. Карандеева</i>	43
Анализ высокочастотной составляющей нейтронного шума на динамических режимах ВВЭР-1200	
<i>Г.В. Аркадов, М.Т. Слепов</i>	57
Обзор нейтронно-физических результатов радиального профилирования на примере элементарной ячейки реактора типа ВВЭР-1200	
<i>М.А. Попов, Р.А. Внуков, В.В. Колесов</i>	77

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

Национальные проекты в сфере атомной энергетики: сравнение опыта России, Китая и Индии	
<i>О.В. Фокина, И.В. Исупов</i>	93
Анализ динамики травматизма и промышленной безопасности на уранодобывающем предприятии	
<i>М.М. Искаков, Ю.М. Медведева</i>	108
Авторский указатель номера 3 (56), 2025	116

CONTENTS

Vol. 15, No 3, 2025

NUCLEAR, RADIATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY

Implementation of an automated continuous monitoring system for discharge water at Akkuyu NPP

I.I. Zaikin, R.Sh. Valeev, A.S. Voytenko, S.I. Rysny..... 6

Minimization of personnel dose costs using route optimization

O.L. Tashlykov, A.N. Seseikin, D.A. Tatarskikh, D.I. Zavadskii..... 14

DESIGN, MANUFACTURING AND COMMISSIONING OF NUCLEAR INDUSTRY EQUIPMENT

Application of OpenMC code to VVER-1000 MOX Core computational benchmark

D.A. Plotnikov, V.I. Romanenko, D.A. Solovyev, V.G. Zimin, I.A. Molev, V.N. Kudratov, S.V. Ivakhin, B. Djaroum..... 26

Automation of NPP equipment diagnostics using artificial neural networks

A.Yu. Chentsova, N.Yu. Shaposhnikova, I.A. Mikshin, E.V. Vorobiev..... 36

OPERATION OF FACILITIES NUCLEAR INDUSTRY

Sprinkler reagent cleaning experience to improve cooling capacity and evaporative cooling tower efficiency

V.P. Povarov, V.V. Bakulin, N.V. Karandeeva..... 43

Analysis of a high-frequency component of neutron noise in VVER-1200 dynamic modes

G.V. Arkadov, M.T. Slepov..... 57

Review of the neutron physics results of radial profiling using the example of a VVER-1200 reactor unit cell

M.A. Popov, R.A. Vnukov, V.V. Kolesov..... 77

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

National projects in the field of nuclear energy: a comparison of Russia, China and India

O.V. Fokina, I.V. Isupov..... 93

Analysis of injury and industrial safety dynamics at a uranium mining enterprise

M.M. Iskakov, Yu.M. Medvedeva..... 108

Author Index of 3, 2025..... 116

Уважаемые читатели!

Вы держите в руках необычный номер журнала «Глобальная ядерная безопасность». Его выпуск приурочен к 80-летию атомной отрасли.

*Три слова определяют масштаб отрасли: **гордость, вдохновение, мечта**. Атомная отрасль в нашей стране начиналась как ответ на вызовы послевоенного времени, а мирные достижения вдохновляли поколения и расширяли границы возможного.*

Именно эти три слова мы можем в полной мере отнести к юбилейному выпуску журнала. Мы гордимся вкладом наших авторов в науку. Ими движет вдохновение. А материалы, представленные в журнале, способствуют достижению мечты о светлом будущем человечества.

80-летний юбилей атомной промышленности – это не просто историческая веха, она символизирует непрерывную цепь технологической преемственности — от первых уран-графитовых реакторов до термоядерного синтеза.

В далеком 1945-ом году, когда страна должна была ответить на угрозы со стороны США и создать собственное ядерное оружие, чтобы сдержать потенциального противника, советские атомики решили поставленную задачу за четыре года.

И сегодня атомная промышленность России достигла значительных успехов. Мы стали лидерами в мирном использовании атомной энергии: запустили первую в мире АЭС в Обнинске, создали первый атомный ледокол и токамак.

35 энергоблоков дают 19% всей электроэнергии страны. 11 АЭС концерна «Росэнергоатом» работают от Ростова до Певека, но спрос на электричество растет. И здесь атом – не просто вариант. Это гарант стабильности. Он может работать в режиме 24/7.

У атомной промышленности большие перспективы и амбициозные планы: через 18 лет в России должны появиться еще 37 новых атомных энергоблоков большой, средней и малой мощности. Ожидается, что к 2042 году доля атомной генерации увеличится до 23,5%.

И все это создают наши ученые. Результаты исследований и разработок они представляют на страницах ведущих научных журналов, в том числе – журнала «Глобальная ядерная безопасность».

Уважаемые авторы! Коллектив редакционной коллегии поздравляет вас с 80-летием атомной промышленности. Успехов вам в реализации намеченных планов. И пусть ваши достижения работают на благо России, способствуют достижению технологического суверенитета и национальной безопасности.

**Заместитель главного редактора журнала,
руководитель ВИТИ НИЯУ МИФИ,
д-р социол. наук, профессор,
В.А. Руденко**

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

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-01>

EDN EQNWFX

Оригинальная статья / Original paper



**Внедрение системы автоматического непрерывного мониторинга
сбросных вод на АЭС «Аккую»**

И.И. Зайкин¹ ✉, Р.Ш. Валеев¹, А.С. Войтенко¹, С.И. Рясный²

¹АО «Аккую Нуклеар», Турецкая Республика

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация

✉ zaykin@hotmail.com

Аннотация. В условиях усиления требований к экологической ответственности атомной энергетики возрастает значение внедрения систем автоматического мониторинга сбросных вод. Настоящая статья посвящена анализу обоснования и практической реализации системы автоматического непрерывного мониторинга сбросных вод (SAİS) на примере АЭС «Аккую». Описаны нормативные основания, включая международные рекомендации МАГАТЭ и требования экологического законодательства Турецкой Республики, а также методологический подход к проектированию системы. Проанализированы основные источники потенциального воздействия сбросных вод АЭС на морскую экосистему и обоснована необходимость их непрерывного контроля. Представлены основные технические характеристики SAİS, ее архитектура, измерительные контуры и средства передачи данных. Особое внимание уделено вопросам метрологического обеспечения и контроля качества измерений. Отмечено, что реализованная система обеспечивает непрерывный контроль ключевых параметров сточных вод, надежную передачу данных в режиме реального времени в централизованную базу надзорного органа и юридически значимую фиксацию экологических показателей. Проведен сравнительный анализ Турецкого подхода к онлайн-мониторингу с принятой в России практикой лабораторного контроля. Обсуждаются преимущества SAİS как инструмента цифровой трансформации экологического мониторинга и возможности масштабирования подобного опыта на атомные станции в России. Сделан вывод о значимости автоматизированного мониторинга для повышения прозрачности, снижения экологических рисков и укрепления общественного доверия к атомной отрасли.

Ключевые слова: атомная электростанция «Аккую», экологическая безопасность, автоматизированная система, сбросные воды, мониторинг, устойчивое развитие, международные стандарты, метрологическое обеспечение.

Для цитирования: Зайкин И.И., Валеев Р.Ш., Войтенко А.С., Рясный С.И. Внедрение системы автоматического непрерывного мониторинга сбросных вод на АЭС «Аккую». *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(3):6–13. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-01>

For citation: Zaikin I.I., Valeev R.Sh., Voytenko A.S., Ryasny S.I. Implementation of an automated continuous monitoring system for discharge water at Akkuyu NPP. *Nuclear Safety*. 2025;15(3):6–13. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-01>

**Implementation of an automated continuous monitoring system for discharge water at
Akkuyu NPP**

Ivan I. Zaikin¹ ✉, Rinat Sh. Valeev¹, Andrey S. Voytenko¹, Sergey I. Ryasny²

¹Akkuyu Nuclear JSC, Republic of Turkey

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

✉ zaykin@hotmail.com

Abstract. The importance of implementing automated wastewater monitoring systems is growing as environmental responsibility requirements for nuclear energy become increasingly stringent. This article considers the rationale and practical implementation of an automatic continuous wastewater monitoring system (SAİS) using the Akkuyu NPP as a case study. The regulatory foundations are described, including international IAEA recommendations and the

environmental legislation of the Republic of Turkey, as well as the methodological approach to system design. The main sources of potential impacts of NPP discharges on the marine ecosystem are analyzed, and the necessity of continuous monitoring is substantiated. Key technical characteristics of SAİS are presented, including its architecture, measurement circuits, and data transmission tools. Special attention is given to metrological support and quality assurance of measurements. It is noted that the implemented system ensures continuous monitoring of key wastewater parameters, reliable real-time data transfer to the centralized database of the supervisory authority, and legally binding recording of environmental indicators. A comparative analysis of the Turkish approach to online monitoring versus the Russian practice of laboratory-based control is provided. The advantages of SAİS as an instrument of digital transformation in environmental monitoring are discussed, along with the potential for scaling this experience to nuclear power plants in Russia. The study concludes that automated monitoring is essential for improving transparency, reducing environmental risks, and strengthening public trust in the nuclear industry.

Keywords: Akkuyu nuclear power plant, ecology, safety, automated system, discharge water, monitoring, sustainable development, international standards.

Обеспечение экологической безопасности водных объектов, подверженных антропогенному воздействию со стороны крупных энергетических объектов, является одним из фундаментальных направлений международного ядерного регулирования в области устойчивого развития ООН, способствующих достижению цели 6: «Чистая вода и санитария» и цели 12: «Ответственное потребление и производство» [1]. Вопросы устойчивого управления водными ресурсами в условиях роста промышленных объектов и глобального изменения климата ставят перед государствами задачу внедрения инструментов экологического контроля, обладающих высокой степенью адаптивности и оперативности.

Атомная электростанция «Аккую» строится в соответствии с соглашением между Правительством Российской Федерации и Правительством Турецкой Республики от 12 мая 2010 г. Согласно статье 2 указанного соглашения, реализация проекта осуществляется с соблюдением требований законодательства Турецкой Республики, включая экологические нормы.

Для понимания целей и задач системы мониторинга необходимо определить состав сбросных вод и связанные с ними потенциальные риски для морской среды. АЭС «Аккую» использует прямоточную (once-through) систему охлаждения, при которой морская вода забирается, проходит через конденсаторы турбин для охлаждения второго контура и сбрасывается обратно в море. Основные факторы потенциального воздействия на экосистему включают:

- тепловая нагрузка. Сбрасываемая вода имеет температуру на несколько градусов выше, чем вода в акватории. Неконтролируемый сброс нагретой воды может привести к термальному стрессу для морских организмов и изменению локальных экосистем;

- химическое воздействие. Для предотвращения биологического обрастания внутренних поверхностей системы охлаждения (водорослями, моллюсками) морская вода на входе обрабатывается биоцидом – гипохлоритом натрия (NaOCl). Важно контролировать концентрацию остаточных окислителей в точке сброса, чтобы минимизировать их воздействие на морскую флору и фауну;

- повышенная минерализация. Для собственных нужд станция использует опреснительные установки, в результате работы которых образуется концентрат (рассол) с соленостью, превышающей фоновые значения. Этот поток смешивается с основным объемом охлаждающей воды перед сбросом.

Таким образом, задача эффективного экологического контроля заключается в непрерывном отслеживании ключевых физико-химических параметров сбросных вод для удержания их воздействия в рамках нормативных лимитов. Внедрение системы SAİS является инструментом для решения этой задачи.

В целях соблюдения требований национального законодательства Турции по экологической безопасности в проектную документацию станции в качестве внешнего контура системы технического водоснабжения включена система автоматического непрерывного мониторинга сбросных вод

(Sürekli Atıksu İzleme Sistemi – SAİS), внедрение которой представляет собой не только выполнение формального требования законодательства Турции, но и реализацию принципов проактивного экологического управления и цифровой трансформации контроля. В настоящий момент официально утверждено решение о включении системы SAİS в проект АЭС «Аккую» и ведутся активные работы по ее реализации¹.

Принципы внедрения SAİS соответствуют как международным, так и национальным нормативным основаниям, в том числе рекомендациям МАГАТЭ, изложенным в следующих документах:

- IAEA NS-R-3 Rev.1 «Site Evaluation for Nuclear Installations» [2];
- IAEA GSR Part 3 «Radiation Protection and Safety of Radiation Sources» [3];
- IAEA SSG-13 «Monitoring for Compliance with Exemption and Clearance Levels» [4].

В соответствии с национальным регулированием обязательства по установке системы SAİS определяются следующими нормативными актами:

- Закон № 2872 «Об охране окружающей среды» (09.08.1983) [5];
- Положение о контроле загрязнения воды [6] (Resmî Gazete № 25687 от 31.12.2004);
- Коммюнике [7] о системах непрерывного мониторинга сточных вод № 29303 от 22.03.2015 (в ред. 2019 г.).

Согласно статье 2 Коммюнике № 29303 [7], установка SAİS является обязательной для объектов с объемом сброса, превышающим 5000 м³/сутки. Проектный расход охлаждающей воды только на один энергоблок АЭС «Аккую», по данным проектной документации, составляет около 6,6 млн м³/сутки. Таким образом, фактический объем сброса многократно превышает установленный законодательством порог, что обу-

славливает безусловную необходимость внедрения системы.

В соответствии с положениями Коммюнике [7] SAİS представляет собой полностью автоматизированный комплекс, предназначенный для:

- непрерывного мониторинга состава сточных вод до момента их смешивания с приемной средой;
- обеспечения достоверной передачи данных в режиме реального времени в центральную систему мониторинга Министерства окружающей среды, урбанизации и изменения климата Турецкой Республики (ЦСММ);
- создания юридически значимых протоколов качества воды, пригодных для анализа и сравнения.

Проектные требования и технические характеристики SAİS включают следующее:

- Согласно Коммюнике [7], SAİS должна обеспечивать непрерывный контроль следующих параметров: pH; температура; растворенный кислород; электропроводность; скорость потока и общий дебит; взвешенные вещества (АКМ); химическое потребление кислорода (ХПК). Выбор данных параметров обусловлен их высокой экологической значимостью: температура и РК являются ключевыми показателями для предотвращения термального стресса и заморов морской фауны, а pH и электропроводность (косвенно характеризующая соленость) позволяют отслеживать эффективность смешения сбросных вод с морской водой.

– Система должна включать автоматический отбор проб, модуль передачи данных в ЦСММ, архив хранения не менее 5 лет, систему сигнализации, систему резервного электропитания, климатический и противопожарный контроль, видеонаблюдение.

– Размещение SAİS осуществляется на водоотводящем сооружении с максимальным приближением к точке сброса, но до зоны смешивания с морской водой, в наименее турбулентной зоне потока. Выбор точки установки согласуется с органами охраны окружающей среды, с обязательным исключением обратных потоков, попадающих в линию отбора.

¹ Проект сооружаемой АЭС «Аккую» (Турция) будет дополнен системой автоматического мониторинга отводимой воды. – Росатом. АКУЮ Нуклеар. – Режим доступа: <https://akkuyu.com/ru/news/proekt-sooruzhaemoy-aes-akkuyu-turtsiya-budet-dopolnen-sistemoy-avtomaticheskogo-monitoringa-otvodim> (дата обращения: 09.06.2025).

Размещение точки отбора проб и измерительных датчиков осуществляется на конечном участке водосбросного канала, непосредственно перед смешением вод с морской средой. Особое внимание при проектировании уделяется правильному выбору места установки в наименее турбулентной зоне потока. Это инженерное решение, а не алгоритмическая компенсация, позволяет обеспечить репрезентативность проб и стабильность измерений, в частности, для корректной работы расходомера.

Архитектурная структура системы строится по модульному принципу и предполагает интеграцию различных измерительных датчиков, объединенных программно-аппаратным комплексом с возможностью передачи данных в централизованные хранилища. Размещение оборудования в термостатированной кабине с резервным питани-

ем (ИБП) продиктовано необходимостью обеспечить стабильность измерений и защиту высокоточного оборудования от агрессивных условий прибрежной зоны (влажность, солевой туман), а также гарантировать непрерывность передачи юридически значимых данных.

Особое внимание при проектировании уделяется изолированности элементов, надежности к коррозионному воздействию морской воды, а также резервируемости каналов связи и энергопитания. Важно отметить, что SAIS учитывает специфику измерения в зонах высокой турбулентности, что требует точной калибровки и применения компенсационных алгоритмов при интерпретации данных.

На рисунке 1 показана принципиальная схема системы SAIS.

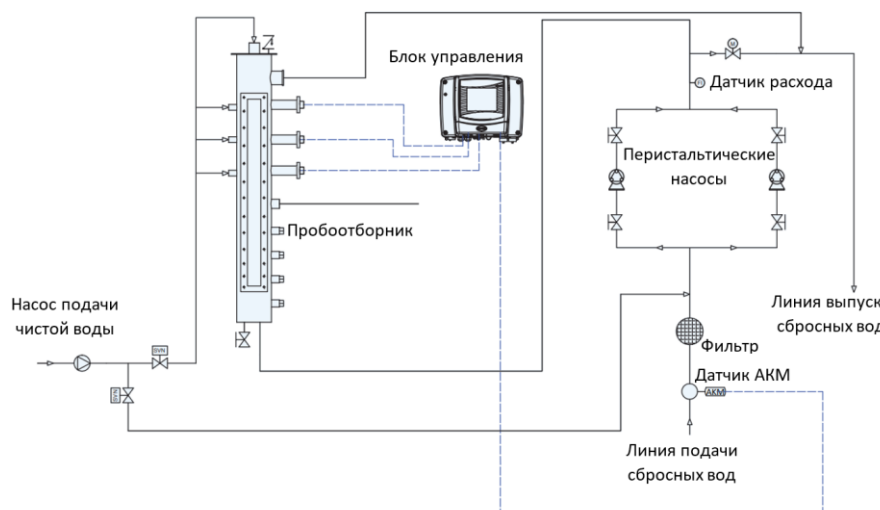


Рисунок 1. Принципиальная схема системы SAIS²
Figure 1. Block diagram of the SAIS system²

Функциональные компоненты SAIS включают (рис. 2):

1. Кабину измерительной станции площадью не менее 8 м², которая термо- и гидроизолирована, оснащена системой климат-контроля (инверторный кондиционер) и имеет автономную противопожарную защиту, аварийное освещение, систему видеонаблюдения и сигнализации.

2. Измерительную цепочку с датчиками контроля параметров:

- pH,
- температура (°C),
- растворенный кислород (мг/л),
- электропроводность (мкСм/см),
- химическое потребление кислорода (ХПК, мгО/л),
- взвешенные вещества (АКМ, мг/л),

² Принципиальная схема из каталога SAIS. – 22 марта 2015 г. Официальный вестник № 29303. Уведомление от Министерства окружающей среды и урбанизации: Уведомление о системе непрерывного мониторинга сточных вод. Первая часть. – Режим доступа: <https://arsendustriyel.com/wp-content/uploads/2020/02/ARS-SA%C4%B0S-Katalo%C4%9Fu.pdf> (дата обращения: 21.05.2025).

– расход (л/с или м³/сут) с использованием электромагнитного расходомера.

Все параметры должны соответствовать требованиям стандарта [8], включая процедуру валидации.

3. Пробоотборную систему [9], обеспечивающую:

- автоматический отбор, охлаждение, защиту от конденсата;
- возможность параллельной передачи пробы в аккредитованную лабораторию;
- наличие фильтров с ячейкой от 0,5 до 1,5 см, исключающих крупные включения без искажения АКМ.

4. Насосную систему в составе двух перистальтических насосов, имеющих частотно-регулируемый привод с контролем скорости от 0,5 до 1,0 м/с по трубе отбора. Трубопроводы насосной системы выполнены из коррозионностойких материалов и имеют изоляцию от перепадов температуры.

5. Систему архивации и передачи данных, обеспечивающую:

- прямую передачу данных в ЦСММ;
- хранение данных на жестком диске не менее 5 лет;
- доступ по защищенному интернет-каналу.

6. Систему автономного энергоснабжения, включающую источник бесперебойного питания (UPS) с поддержкой работы системы минимум 120 минут (исключая насос и кондиционер) и обеспечивающую приоритет на бесперебойную передачу данных и защиту архивов.

Дополнительно предусмотрены:

- система автоматической промывки труб перед анализом;
- сигнализация превышения нормативов с привязкой к временным меткам;
- протоколирование вскрытия кабины и действий оператора.

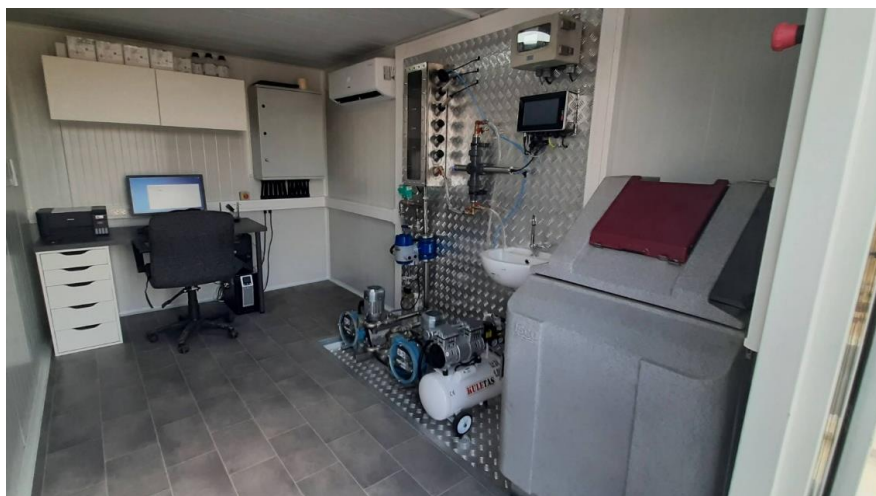


Рисунок 2. Пример внутренней компоновки кабины SAIS³
Figure 2. Example of the SAIS cabin internal layout³

Функционирование системы начинается с непрерывного забора пробы воды из водосбросного канала с помощью насосной системы. Проба по изолированному трубопроводу поступает в измерительную ячейку внутри кабины, где многопараметрический зонд в режиме реального времени фиксирует значения pH, температуры, растворенного кислорода и электропроводности. Одновре-

менно расходомер в канале измеряет скорость потока. Все данные поступают на промышленный контроллер, который архивирует их и посредством защищенного модема передает в ЦСММ. В случае превышения установленных нормативов система автоматически генерирует тревожное сообщение и консервирует образец для последующего исследования независимой лабораторией.

³ Система непрерывного мониторинга сточных вод SAIS. – Режим доступа: <https://www.enotek.com.tr/sais-surekli-atik-su-izleme-sistemi> (дата обращения: 21.05.2025).

Для обеспечения достоверности и юридической значимости данных, передаваемых в надзорный орган, система SAİS функционирует в рамках турецкой государственной системы обеспечения единства измерений.

Ключевым стандартом, регламентирующим требования к оборудованию, является TS EN ISO 15839 «Качество воды. Датчики/аналитическое оборудование для воды. Технические характеристики и эксплуатационные испытания» [8]. Этот стандарт определяет методики валидации, требования к точности, диапазонам измерений и процедурам тестирования онлайн-сенсоров.

Контроль качества измерений реализуется на двух уровнях: внутренним и внешним. Внутренний контроль включает регулярную калибровку и техническое обслуживание датчиков в соответствии с инструкциями производителя и требованиями стандарта

ISO 15839. Внешний контроль опирается на законодательно закрепленную процедуру «Bütünleşik Karşılaştırma Testi» (интеграционные сравнительные испытания), в рамках которой аккредитованная лаборатория периодически проводит параллельный отбор проб и их анализ с последующим сличением результатов с показаниями SAİS. Это обеспечивает независимую верификацию работы системы.

Внедрение SAİS на АЭС «Аккую» позволяет провести сравнение двух различных моделей экологического контроля. Согласно СТО 1.1.1.01.0678-2023 (п. 10.3.2.15 и 10.3.2.17)⁴, требуется определение среднесуточного расхода и незамедлительное информирование в случае аварийного сброса, но акцент сделан на дискретном лабораторном контроле. Различия в подходах представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение подходов к мониторингу сбросных вод

Table 1. Comparison of approaches to wastewater monitoring

Характеристика	Типовая практика ТР	Типовая практика в РФ
Методология	Смешанная методология: непрерывная, автоматизированная, онлайн и дискретная, ручной отбор, лабораторный анализ	Дискретная, ручной отбор, лабораторный анализ
Оперативность	В режиме реального времени	Задержка от часов до нескольких дней
Контролируемые параметры	Ключевые оперативные индикаторы (рН, температура, растворенный кислород, электропроводность, химическое потребление кислорода, взвешенные вещества, расход)	Широкий спектр (включая нефтепродукты, химическое потребление кислорода, радионуклиды)
Влияние человеческого фактора	Минимизировано	Значительное (отбор, транспортировка, анализ)
Юридический статус данных	Данные напрямую поступают регулятору и являются основой для надзора	Протоколы лаборатории, предоставляемые по графику
Основная цель	Превентивный контроль, оперативное реагирование	Верификация соответствия нормативам по итогам периода

Таким образом, турецкая модель ориентирована на превентивный контроль и мгновенное выявление отклонений по ключевым индикаторам, тогда как российская модель делает акцент на пост-анализе широкого спектра загрязнителей. Важно отметить, что

онлайн-мониторинг SAİS не отменяет полностью необходимость лабораторных анализов (например, для контроля радионуклидов или специфических химических веществ), а дополняет их, создавая двухуровневую систему контроля.

Внедрение аналогичных SAİS-решений в России может стать ключевым элементом развития цифровой среды экологической безопасности на объектах ядерной энергетики. Это позволит обеспечить верифицированную отчетность в режиме реального вре-

⁴ СТО 1.1.1.01.0678-2023. Основные правила обеспечения эксплуатации атомных станций. Режим доступа: <https://meganorm.ru/Index2/1/4293748/4293748439.htm> (дата обращения: 27.08.2025).

мени, улучшить взаимодействие с органами исполнительной власти в сфере обеспечения экологической безопасности и повысить соответствие ESG-метрикам, что особенно важно в контексте глобальной декарбонизации и требования устойчивого финансирования инфраструктурных проектов.

Внедрение SAİS-подобных систем обеспечит:

- оперативное выявление отклонений;
- снижение влияния человеческого фактора;
- повышение точности и полноты экологической отчетности;
- обеспечение принципа прозрачности экологической информации;
- соответствие рекомендациям МАГАТЭ и международным экологическим стандартам.

В условиях стремительной цифровизации промышленности автоматизированные экологические системы становятся неотъемлемой частью концепции «умной станции». Включение SAİS-решений в инфраструктуру АЭС позволит создать предпосылки для предиктивного анализа и построения цифровых двойников систем циркуляционного и технического водоснабжения.

Заключение

Постоянный автоматизированный контроль сточных вод снижает экологические риски, укрепляет доверие общественности и регуляторов, и соответствует международной практике устойчивого природопользования.

Процесс внедрения SAİS на АЭС «Аккую» демонстрирует прогрессивный подход к экологическому мониторингу и отвечает как требованиям законодательства Турецкой Республики, так и международным стандартам в области ядерной и экологической безопасности, обеспечивая метрологически подтвержденный, непрерывный и прозрачный контроль за воздействием на окружающую среду.

Реализация на АЭС «Аккую» российской конструкции требований турецкого законодательства – это редкий пример успешного импорта правовой нормы более высокого уровня экологической строгости, чем в стране-экспортере технологии.

Распространение аналогичных решений на российские объекты целесообразно с точки зрения повышения прозрачности и ответственности атомной энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Повестка дня в области устойчивого развития до 2030 года. ООН, 2015. Режим доступа: <https://docs.un.org/ru/A/RES/70/1> (дата обращения: 27.08.2025).
2. IAEA. Site Evaluation for Nuclear Installations, NS-R-3 Rev.1. Vienna: IAEA, 2016. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1709_E_web.pdf (accessed: 27.08.2025).
3. IAEA. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. GSR Part 3. Vienna: IAEA, 2014. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1578_web-57265295.pdf (accessed: 14.05.2025).
4. IAEA Monitoring for Compliance with Exemption and Clearance Levels, SSG-13 Vienna: IAEA, 2014. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1469r_web.pdf (accessed: 27.08.2025).
5. ÇEVRE Kanunu. Kanun Numarası: 2872 Available at: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=2872&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5> (accessed: 27.08.2025).
6. SU KİRLİLİĞİ KONTROLÜ YÖNETMELİĞİ, № 25687, 31.12.2004. (Türkiye). Available at: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=7221&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5> (accessed: 14.05.2025).
7. SÜREKLİ ATIKSU İZLEME SİSTEMLERİ TEBLİĞİ, № 29303, 22.03.2015. (Türkiye). Available at: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/03/20150322-4.htm> (accessed: 14.05.2025).
8. TS EN ISO 15839. Water quality. On-line sensors/analysing equipment for water. Specifications and performance test. Available at: <https://www.iso.org/standard/28740.html> (accessed: 27.08.2025).
9. TS ISO 5667-10. Water quality. Sampling. Part 10: Guidance on sampling of waste waters. Available at: <https://www.iso.org/standard/11773.html> (accessed: 27.08.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Зайкин И.И. – инициировал внедрения SAIS на АЭС «Аккую», анализ нормативных требований и проектных решений, сформулировка технических предложений по реализации системы, подготовка финальной версии статьи, включая обзор нормативных требований и технических характеристик системы;

Валеев Р.Ш. – руководитель проекта, общее руководство и координация работы, предоставление доступа к необходимым данным и информации о проекте, участие в обсуждении ключевых аспектов внедрения системы и внесение правок в текст статьи;

Войтенко А.С. – руководитель проекта, общее руководство и координация работы, предоставление доступа к необходимым данным и информации о проекте, участие в обсуждении ключевых аспектов внедрения системы и внесение правок в текст статьи;

Рясный С.И. – научный руководитель, методологический надзор за исследованием, консультирование по вопросам соответствия проекта международным стандартам, таким как требования МАГАТЭ и ООН, помощь в формулировании заключений статьи и ее подготовке к публикации.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ:

Авторы выражают признательность специалистам АО «Аккую Нуклеар» за предоставленные данные и техническую информацию, использованную при подготовке статьи, а также коллегам, принимавшим участие в обсуждении проектных и нормативных решений, связанных с внедрением системы SAIS.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Иван Игоревич Зайкин, кандидат технических наук, эксперт, АО «Аккую Нуклеар», Турецкая Республика.
e-mail: zaykin@hotmail.com

Ринат Шамильевич Валеев, заместитель технического директора по радиационной защите и обращению с радиоактивными отходами, АО «Аккую Нуклеар», Турецкая Республика.
e-mail: info@akkuyu.com

Андрей Сергеевич Войтенко, кандидат биологических наук, начальник отдела охраны окружающей среды, АО «Аккую Нуклеар», Турецкая Республика.
e-mail: info@akkuyu.com

Сергей Иванович Рясный, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация.
e-mail: esp.izmailovo@mail.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Zaykin I.I. – initiating the implementation of SAIS at the Akkuyu NPP, conducting an analysis of regulatory requirements and design solutions, formulating technical proposals for system implementation, preparing the final article version, including a review of system regulatory requirements and technical specifications;

Valeev R.Sh. – project manager, overall work guidance and coordination, facilitating access to the necessary data and project information, participating in discussions on key aspects, making significant manuscript revisions;

Voytenko A.S. – project manager, overall work guidance and coordination, facilitating access to the necessary data and project information, participating in discussions on key aspects, making significant manuscript revisions;

Ryasny S.I. – a research supervisor, study methodological oversight, consulting on the project compliance with international standards such as IAEA and UN requirements, contributing to the article conclusions formulation and its publication preparation.

FUNDING:

The authors declare no external funding.

ACKNOWLEDGEMENTS:

The authors would like to thank the specialists of Akkuyu Nuclear JSC for providing data and technical information used in the preparation of this article, as well as the colleagues who participated in discussions on the design and regulatory solutions related to the implementation of the SAIS system.

CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare no conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Ivan I. Zaykin, Cand. Sci. (Engin), expert, Akkuyu Nuclear JSC, Republic of Turkey.
e-mail: zaykin@hotmail.com

Rinat Sh. Valeev, Deputy Technical Director for Radiation Protection and Radioactive Waste Management, Akkuyu Nuclear JSC, Republic of Turkey.
e-mail: info@akkuyu.com

Andrey S. Voytenko, Cand. Sci. (Biological), Head of Environmental Protection Department, Akkuyu Nuclear JSC, Republic of Turkey.
e-mail: info@akkuyu.com

Sergey I. Ryasny, Dr. Sci. (Engin), Professor, National Research University «MPEI», Moscow, Russian Federation.
e-mail: esp.izmailovo@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 03.06.2025

После доработки / Revision 05.09.2025

Принята к публикации / Accepted 09.09.2025

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

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-02>

EDN GAORPS

Оригинальная статья / Original paper



**Минимизация дозовых затрат персонала с использованием
маршрутной оптимизации**

О.Л. Ташлыков , А.Н. Сесекин , Д.А. Татарских, Д.И. Завадский 

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург,

Российская Федерация

 danilezavadsky@gmail.com

Аннотация. Основные принципы радиационной безопасности, в особенности принцип оптимизации, обеспечивают защиту персонала от ионизирующего излучения на основных стадиях жизненного цикла атомных электрических станций, от проектирования до этапа вывода из эксплуатации. В 2007 г. Международная комиссия по радиологической безопасности (МКРЗ) выпустила рекомендации (Публикация 103), которые усиливают значимость оптимизации радиационной защиты, распространяя успешный опыт внедрения этого требования в практику, включая ситуации планируемого облучения. Проведение эксплуатирующей организацией АЭС России (АО «Концерн Росэнергоатом») последовательной политики, направленной на внедрение и реализацию методологии оптимизации радиационной защиты, в целом на всех АЭС, начиная с 1996 г. (переход на новые дозовые пределы), привело к снижению коллективных доз облучения персонала примерно в 4 раза. Методика работы по оптимизации радиационной защиты персонала АЭС включает в себя: критический подход к организационным и техническим мероприятиям при производстве работ, дезактивацию и выполнение необходимых переключений, проведение измерений радиационной обстановки, снижение продолжительности работ в условиях облучения. Целью представленных в статье исследований является разработка программной системы, позволяющей формировать маршруты перемещения персонала с минимальной суммарной дозовой нагрузкой в помещениях с неоднородными радиационными полями. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: анализ проблемы планирования безопасного перемещения в радиационно-опасных зонах; построение математической модели радиационного поля методом радиальных базисных функций (RBF, Radial Basis Functions); разработка алгоритмов поиска оптимального пути с учетом переменной дозовой нагрузки (A^* , A-star, динамическое программирование). В статье представлены варианты решения задачи минимизации дозовых затрат персонала применительно к реальному радиационно-опасному помещению АЭС с помощью математических методов маршрутной оптимизации. Описаны основные этапы разработки алгоритма, позволяющего автоматически формировать оптимальные маршруты с учетом неоднородности радиационной обстановки в пространстве, размеров помещения и расположения в нем оборудования и других элементов. Научная новизна исследований заключается в применении метода радиальных базисных функций (RBF) в сочетании с алгоритмами маршрутизации на графах, адаптированными под критерий минимизации дозы облучения, а также в использовании модифицированного уравнения Беллмана для оптимального выбора порядка прохождения контрольных точек.

Ключевые слова: доза облучения, неоднородное радиационное поле, оптимизация маршрута, RBF-интерполяция, алгоритм A^* (A^* , A-star), динамическое программирование, граф.

Для цитирования: Ташлыков О.Л., Сесекин А.Н., Татарских Д.А., Завадский Д.И. Минимизация дозовых затрат персонала с использованием маршрутной оптимизации. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(3):14–25. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-02>

For citation: Tashlykov O.L., Seseikin A.N., Tatarskikh D.A., Zavadskii D.I. Minimization of personnel dose costs using route optimization. *Nuclear Safety*. 2025;15(3):14–25. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-02>

Minimization of personnel dose costs using route optimization

Oleg L. Tashlykov¹ , Alexander N. Seseikin , Daria A. Tatarskikh, Daniil I. Zavadskii 

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg,
Russian Federation

 danilezavadsky@gmail.com

Abstract. The principle of optimization is of great practical importance for ensuring the radiation safety of personnel at all stages of the NPP life cycle, especially, newly designed nuclear power plants. In 2007, the International Commission on Radiological Protection (ICRP) issued recommendations (Publication 103). The recommendations further reinforce the importance of optimizing radiation protection by disseminating successful experiences in implementing this requirement in practice, now including situations of planned exposure. The consistent policy pursued by the operating organization of Russia's nuclear power plants (Rosenergoatom Concern) has been pursuing a consistent policy to introduce and implement a methodology for optimizing radiation protection at all nuclear power plants since 1996 (transition to new dose limits), which has led to a reduction in collective radiation doses for personnel by approximately four times. Areas for further optimization of radiation protection for personnel are determined by individual dose management (improving work organization, improving the radiation environment, reducing time spent in dose fields). The objective of the work is to develop a software system that allows the creation of personnel movement routes with minimal total dose exposure in rooms with heterogeneous radiation fields. The following tasks are accomplished to achieve the goal: analysis of the safety movement problem in radiation-hazardous areas; construction of a mathematical model of the radiation field using the radial basis function (RBF) method; development of pathfinding algorithms taking into account dose load (A^* , A-star, dynamic programming). The article presents problem solutions using mathematical route optimization methods that minimize personnel dose costs in relation to a real radiation-hazardous room at a nuclear power plant. The main stages of developing an algorithm that automatically generates optimal routes, taking into account the heterogeneous radiation environment in the space, the size of the room, and the location of equipment and other elements within it, are described. The scientific novelty of the research lies in the application of the radial basis function (RBF) method in combination with graph routing algorithms adapted to the radiation dose minimization criterion, as well as in the use of a modified Bellman equation for the optimal selection of the order of passing control points.

Keywords: exposure dose, heterogeneous radiation field, route optimization, RBF interpolation, A^* algorithm (A^* , A-star), dynamic programming, graph.

Введение

Принцип оптимизации, как один из основополагающих в обеспечении радиационной безопасности персонала имеет важное практическое значение не только при эксплуатации и выводе из эксплуатации, но и при проектировании новых АЭС и должен реализовываться по всем возможным направлениям [1]. АО «Концерн Росэнергоатом», как эксплуатирующая организация АЭС России, начиная с 1996 г. последовательно проводит политику, направленную на внедрение и реализацию методологии оптимизации радиационной защиты на атомных станциях и в районе расположения АЭС, в целом на всех АЭС. Начиная с 1996 г. (переход на новые дозовые пределы, установленные НРБ-96/99), годовые коллективные дозы облучения персонала снижены примерно в 4 раза. Благодаря проведению комплекса организационных и технических мероприятий за период с 2019 по 2023 гг.

с учетом дополнительных радиационно-опасных работ, в связи с продлением сроков эксплуатации некоторых энергоблоков России, а также восстановительных операций на АЭС с РБМК достигнуты следующие результаты:

- исключено превышение индивидуальной эффективной дозы облучения более 18 мЗв в год;
- максимальная суммарная индивидуальная эффективная доза за 5 лет не превысила 80 мЗв ни на одной АЭС;
- коллективные дозы снижены с 1,15 чел.-Зв/блок до 0,86 чел.-Зв/блок, что составляет примерно 25 %;
- индекс коллективной дозы энергоблоков с реакторами ВВЭР в сравнении с региональными центрами ВАО АЭС снижен в 1,5 раза (с 0,58 чел.-Зв в 2019 г. до 0,36 чел.-Зв в 2023 г.).

При достигнутых результатах дальнейшая оптимизация радиационной защиты персо-

нала на АЭС определяется реализацией комплекса мероприятий, направленных на управление индивидуальными дозами, так как минимизация индивидуальных доз является основной составляющей частью стратегии снижения коллективной дозы АО «Концерн Росэнергоатом».

Неоднородность радиационных полей обусловлена типом и количеством радиоактивных изотопов, загрязняющих поверхности (стены, пол и оборудование), а также удаленностью работника от источника излучения. В результате, суммарная доза облучения персонала во время работы зависит от выбранного маршрута и порядка демонтажа радиоактивных компонентов [2]. Это открывает широкие возможности в части снижения дозовых нагрузок путем оптимизации маршрутов в зонах с нестационарным ионизирующим излучением. Поиск наиболее подходящего пути перемещения или оптимальной последовательности демонтажных работ с радиоактивным оборудованием может существенно уменьшить облучение. Важно отметить, что кратчайший путь не всегда гарантирует наименьшую эффективную дозу [3].

Авторы статьи впервые ввели и использовали понятие «задача дозиметриста» при изучении практического применения автоматизированной системы обработки данных нештатных измерений радиационной обстановки [4,5]. Анализ проводился на остановленных энергоблоках №1 и №2 Белоярской АЭС в рамках реализации Программы оптимизации радиационной защиты, разработанной АО «Концерн Росэнергоатом», и необходимости оптимизации маршрутов дозиметристов при выполнении замеров.

Для достижения поставленной цели был создан алгоритм, определяющий наиболее эффективный маршрут передвижения. Алгоритм учитывает наличие преград и возможность посещения заранее определенных точек в помещении, где требуется выполнение работ по оценке радиационной обстановки (например, измерение мощности дозы излучения, отбор образцов и прочее) [6].

Для нахождения функций стоимостей с учетом возможности обхода препятствий, рассматривался метод Дейкстры, с помощью

которого находились кратчайшие пути в графе. Более подробно эта процедура описана в статье [7].

Объект исследования

Перспективным направлением сокращения времени пребывания персонала в радиационных полях (минимизации дозы облучения) является разработка 3D-моделей помещений энергоблока с РУ БН-600 [8]. Для оптимизации передвижения в разнообразных радиационных средах были созданы трехмерные модели помещений. Они нашли применение в начальном обучении персонала: для операторов и, что особенно важно, для ремонтных бригад. Это решение позволило существенно уменьшить время, затрачиваемое на перемещения, и оперативно обнаруживать нужное оборудование [9].

Эксплуатация АЭС предполагает регулярные регламентные обходы оперативным персоналом по заданным маршрутам для контроля работы оборудования, систем, снятия показаний приборов, в том числе посещение помещений зоны контролируемого доступа с повышенным радиационным фоном. При этом работник должен посетить определенные точки в конкретном помещении, где осуществляются регламентные действия. Особенностью данной задачи, осложняющей ее решение, является применение метода радиальных базисных функций (RBF) в сочетании с алгоритмами маршрутизации на графах, адаптированными под критерий минимизации дозы облучения, а также в использовании модифицированного уравнения Беллмана для оптимального выбора порядка прохождения контрольных точек.

В качестве объекта исследований эффективности минимизации дозовых затрат путем оптимизации маршрута перемещения человека в данной статье рассматривается «реальное» помещение насосов и теплообменников системы охлаждения и очистки воды бассейна выдержки отработавших тепловыделяющих сборок. В помещении располагаются два насоса и два теплообменника, трубопроводы и бак запаса чистого конденсата (рис. 1). Помещение имеет два входа-выхода. Модель помещения рассматривается

в трехмерной системе координат (X, Y, Z – соответственно, ширина, длина и высота помещения). Определены размеры и положение основных элементов.

В помещении зафиксированы 10 точек маршрута, в которых произведены измерения мощности дозы, и производятся регламентные действия оператора (табл. 1).

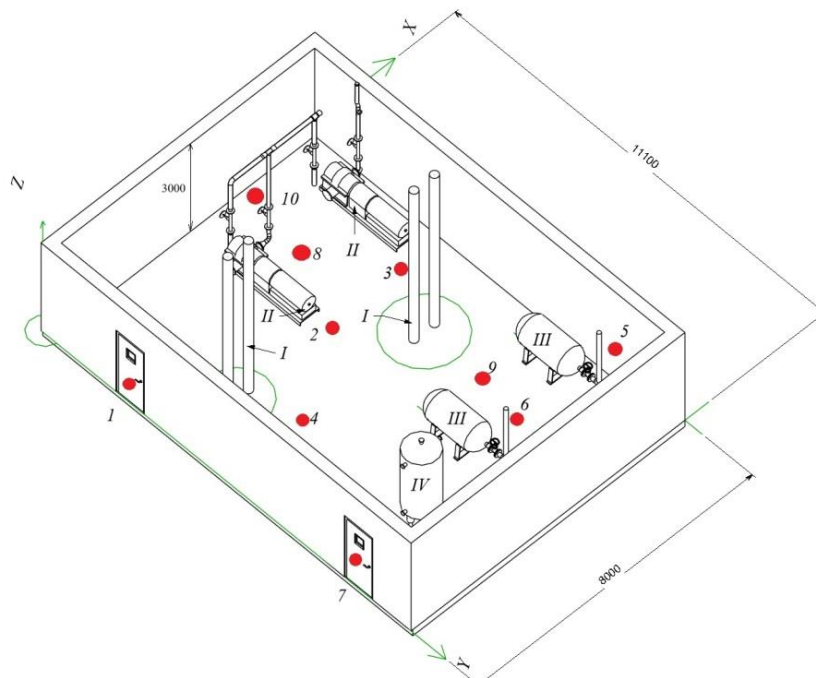


Рисунок 1. Модель помещения насосов и теплообменников: I – трубопроводы; II – насосы; III – теплообменник; IV – бак чистого конденсата; 1-10 – точки обслуживания оборудования; 1, 7 – точки входа-выхода (двери)

Figure 1. Model of the pump and heat exchanger room: I – pipelines; II – pumps; III – heat exchanger; IV – clean condensate tank; 1-10 – equipment maintenance points; 1, 7 – entry/exit points (doors)

Определенный порядок посещения указанных точек отсутствует, но конечной должна быть точка 1 или 7 (выход из помещения). Время нахождения в каждой точке принимается равным 10 секундам.

Таблица 1. Координаты и радиационные параметры (мощность дозы) посещаемых точек маршрута
Table 1. Coordinates and radiation parameters (dose rate) of points visited along the route

№	Координаты точек посещения			Мощность дозы, мкЗв/ч
	X (мм)	Y (мм)	Z (мм)	
1	0	3000	1600	150
2	4250	4350	1600	450
3	7000	4350	1600	1500
4	700	5550	1600	300
5	7000	10000	1600	800
6	4200	10000	1600	800
7	0	9800	1600	200
8	5900	2900	1600	600
9	5800	8250	1600	600
10	5700	800	1600	1600

Необходимо разработать оптимальный маршрут посещения 10-ти точек оператором, при котором полученная индивидуальная доза (мкЗв) будет наименьшей.

Особенность данной задачи, заключается в том, что радиационные параметры (мощность дозы) известны (измерены) только в отдельных точках помещения. Это требует построения карты распределения радиационных параметров с помощью интерполяции. Кроме того, при планировании пути перемещения необходимо учитывать геометрию помещения, включая стены, технические зоны и другие препятствия, через которые невозможно пройти, места расположения обязательных для посещения точек, например, для контроля и обслуживания оборудования [3].

Таким образом, задача построения оптимального маршрута сводится к поиску такого пути перемещения, вдоль которого будет накапливаться минимальная доза при задан-

ной модели радиационного поля, ограничениях движения и наличии препятствий [10]. Рассматриваемая задача значительно сложнее классического поиска кратчайшего пути, так как требует учета непрерывного изменения мощности дозы; пространственного анализа окружающей среды; расчета времени прохождения по маршруту.

Решение этой задачи требует объединения методов интерполяции, численного анализа и алгоритмов на графах [11].

Теоретические основы маршрутизации, включая формализацию задач, методы построения и критерии оптимальности, подробно изложены в работах [12,13], и легли в основу математической части настоящей работы.

Методы и технологии

Интерполяция параметров радиационного поля методом радиальных базисных функций (RBF)

Для решения задачи построения маршрута с минимальной дозой облучения необходимо знать значение мощности дозы излучения во всех точках помещения. В реальных условиях невозможно произвести замеры в каждой расчетной ячейке, поскольку это потребовало бы значительных дозовых затрат дозиметристов. Поэтому первым шагом является построение непрерывного распределения значений мощности дозы в помещении по известным дискретным значениям в отдельных точках с помощью интерполяции [14].

В представленной работе использовался метод радиальных базисных функций (Radial Basis Functions, RBF), являющийся одним из наиболее эффективных методов интерполяции в многомерных пространствах [15]. Он обладает преимуществами по сравнению с простыми методами вроде линейной или билинейной интерполяции: обеспечивает гладкость, устойчивость к шуму и пригоден для обработки неравномерно распределенных данных. Как показывают представленные в работах [6] и [15] результаты исследования эффективности использования различных методов RBF (Cubic, Linear, Quintic, ThinPlate) при различном количестве точек с известными значениями мощности

дозы на основании сравнения расчетных значений, полученных при вычислительном эксперименте на суперкомпьютере «УРАН», и результатов измерения в помещениях остановленных энергоблоков №1 и №2 Белоярской АЭС, максимальное отклонение расчетных данных от «реальных» составляет 9,56% (метод Cubic), 5,46% (метод Linear) 9,99% (метод Quintic), 5,88% (метод ThinPlate).

Алгоритмы поиска пути в графах

Задача построения маршрута между двумя точками с учетом минимизации определенного критерия – это классическая задача теории графов [16]. В классическом виде она сводится к нахождению пути с наименьшей длиной или стоимостью переходов между вершинами графа. В случае данной работы задача усложняется тем, что есть промежуточные точки, обязательные для посещения, и стоимость перехода между двумя точками определяется не геометрическим расстоянием, а дозой облучения, получаемой при прохождении отрезка пути. Это требует модификации известных алгоритмов под новые условия.

В данной работе рассматриваются два алгоритмических подхода:

- эвристический алгоритм A^* , который обеспечивает быстрый поиск маршрута, близкого к оптимальному;
- итерационный алгоритм, основанный на уравнении Беллмана (динамическое программирование), который обеспечивает глобально оптимальный результат.

Целью алгоритмов поиска является нахождение такого пути $P = \{p_0, p_1, \dots, p_n\}$, соединяющего начальную точку $p_0 = \text{start}$ и конечную точку $p_n = \text{end}$, при котором накопленная доза облучения вдоль маршрута минимальна.

После нахождения интерполирующей RBF функции $F(p) = F((x, y))$, мы можем построить модель нашего пространства в виде двумерной сетки D (grid $N \times M$), каждая ячейка которой D_{ij} имеет постоянную мощность дозы радиации (мкЗв/с), найденной через координаты этой точки и интерполирующей RBF функции:

$$D_{ij} = F(x_i, y_j), \begin{cases} i = 1, \dots, M \\ j = 1, \dots, N \end{cases}$$

Алгоритм A^* (англ. A-star) – это эвристический алгоритм поиска пути, сочетающий элементы жадного поиска и метода Дейкстры. Он широко используется за счет своей эффективности и способности учитывать приближение к цели. Основная идея алгоритма A^* заключается в оценке каждого возможного пути на основе двух составляющих:

$g(n)$ – фактическая стоимость пути от начальной точки до текущей;

$h(n)$ – эвристическая оценка расстояния от текущей точки до цели (чаще всего используется евклидово расстояние).

Суммарная функция стоимости:

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

Поиск маршрута осуществляется с учетом необходимости прохода через все обязательные точки, заданные пользователем. Последовательность прохождения этих точек формируется с помощью жадного алгоритма (greedy algorithm), который минимизирует приблизительную интегральную дозу на отрезке, рассчитываемую как произведение евклидова расстояния между точками на среднюю мощность дозы облучения. Затем для каждого отрезка между выбранными точками с использованием алгоритма A^* строится оптимальный маршрут по сетке [17].

Алгоритм A^* выбирает для обработки те точки, для которых значение $f(n)$ минимально, постепенно приближаясь к цели.

В рамках данной работы алгоритм был адаптирован к задаче с воздействием на человека излучения, в качестве $g(n)$ используется накопленная доза на пройденном маршруте $g(n) = \sum_{k=1}^n Dose(p_{k-1}, p_k)$, где $Dose(p_{k-1}, p_k)$ – доза облучения на отрезке между точками p_{k-1} и p_k .

Кроме алгоритма A^* , учитывающего радиационную обстановку, реализован также метод, называемый далее «произвольный» маршрут, который предполагает действия человека, не имеющего информации о радиационной обстановке в отдельных точках

помещения. Выбор порядка посещения точек производится по ближайшему евклидовому расстоянию, а перемещение между точками осуществляется с помощью классического алгоритма A^* с учетом только евклидова расстояния и обходом препятствий [18]. Этот метод реализован только для сравнения его результатов с основными алгоритмами.

Вторым используемым методом является итерационный алгоритм на основе уравнения Беллмана – динамическое программирование [19]. В классической формулировке уравнение Беллмана описывает оптимальную стоимость достижения цели из любой точки пространства через локальное минимальное обновление (1):

$$V(x) = \min_{x'} \{C(x, x') + V(x')\}, \quad (1)$$

где $V(x)$ – минимальная стоимость достижения цели из точки x ;

$C(x, x')$ – стоимость перехода от x к соседу x' , минимум берется по всем допустимым соседним точкам.

Для задачи построения маршрута с минимальной дозой в условиях неоднородного радиационного поля используется метод динамического программирования на основе уравнения Беллмана, адаптированный к следующей постановке: заданы начальная точка S , конечная точка E , а также множество обязательных промежуточных точек $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$, через которые необходимо пройти в произвольном порядке.

Цель алгоритма – найти маршрут, начинающийся в точке S , проходящий через все точки множества P ровно один раз и заканчивающийся в точке E , при котором суммарная доза облучения будет минимальна [20].

Для решения задачи используется следующая рекурсия Беллмана (2) по подмножествам:

$$V(m, K) = \begin{cases} 0, & \text{если } K = \emptyset \text{ и } m = S \\ \min_{k \in K} (V(k, K \setminus \{k\}) + A_{m,k}), & m < S, \end{cases} \quad (2)$$

где $V(m, K)$ – минимальная накопленная доза при достижении точки m из начальной точки S , пройдя все точки множества $K \subseteq P$;

$A_{k,m}$ – доза облучения при оптимальном перемещении из точки k в точку m , определяемая как суммарная доза вдоль кратчайшего безопасного маршрута по сетке (с учетом препятствий), найденного с использованием итерационного алгоритма Беллмана.

Для каждой пары соседних ячеек вдоль маршрута доза оценивается по формуле (3):

$$a_{i,i+1} = \frac{d_{i,i+1}}{v} \cdot \frac{D(i)+D(i+1)}{2}, \quad (3)$$

где $d_{i,i+1}$ – длина шага между ячейками;

$D(i)$ – мощность дозы в ячейке,

v – скорость перемещения.

Общая доза $A_{k,m}$ – это сумма всех таких $a_{i,i+1}$ вдоль маршрута от k до m .

После завершения рекурсивного построения функции стоимости $V(m, K)$ итоговая минимальная доза для маршрута с обязательным завершением в E вычисляется по формуле (4):

$$Total\ Dose = \min_{p \in P} (V(p, P \setminus \{p\}) + A_{p,E}). \quad (4)$$

Формализация задачи построения маршрута с минимальной дозой

Для реализации программной системы, решающей задачу построения оптимального маршрута в условиях радиационного воздействия, необходимо строго формализовать исходные данные, ограничения и целевую функцию задачи.

В рамках данной работы пространство, в котором перемещается исполнитель, представлено в виде двумерной дискретной сетки [21]. Каждая ячейка этой сетки соответствует фиксированной позиции в помещении (например, квадрат $0,2 \times 0,2$ метра), и может содержать следующие параметры: мощность дозы облучения в данной точке (мкЗв/с); признак проходимости; координаты в сетке: (i, j) .

Также задаются начальная $S = (i_s, j_s)$ точка, конечная точка $E = (i_e, j_e)$, набор из K промежуточных обязательных точек $\{P_k\}$, время обслуживания в каждой точке t , скорость перемещения v (м/с), вводимая пользователем.

Целевая функция задачи – минимизация интегральной дозы вдоль маршрута T , проходящего по множеству ячеек (5):

$$D(T) = \sum_{(i,j) \in T} D_{ij} \frac{d_{ij}}{v}, \quad (5)$$

где D_{ij} – мощность дозы в ячейке (мкЗв/с);

d_{ij} – длина перехода между соседними точками;

v – скорость перемещения (м/с).

Для учета времени обслуживания используется формула (6):

$$D_{\text{обслуж}} = \sum_{i=1}^K P_i \cdot t, \quad (6)$$

где P_i – мощность дозы в i -й обязательной к посещению точке;

t – время обслуживания.

Эта доза не влияет на построение пути, но учитывается в итоговой сумме при посещении помещения.

Таким образом, задача состоит в том, чтобы среди всех допустимых путей от S до E , проходящих только по проходимым ячейкам и (при необходимости) через обязательные точки $\{P_k\}$, найти такой маршрут T , для которого суммарная доза $D(T)$ будет минимальной.

Визуально это эквивалентно поиску кратчайшего пути на взвешенном ориентированном графе, где:

- каждая вершина соответствует ячейке сетки;

- ребра соединяют соседние ячейки (8-связность (возможность перемещения по 8 направлениям: 4 ортогональным и 4 диагональным));

- вес ребра соответствует дозе, получаемой при переходе между ячейками.

Таким образом, задача маршрутизации в неоднородном радиационном поле сводится к классической задаче поиска пути в графе, но с особенностями:

- поле весов задано функцией (интерполяцией);

- стоимость перехода определяется дозой, а не расстоянием;

- возможны дополнительные ограничения (непроходимые зоны, скорость, промежуточные точки).

Эта формализация позволяет использовать алгоритмические подходы и создавать адаптируемые решения, гибко реагирующие на структуру конкретного помещения и конфигурацию радиационного поля [5].

Результаты и их обсуждение

На основании формализации, задача построения маршрута с минимальной дозой в условиях радиационного воздействия может быть сформулирована как поиск допустимого пути на сетке, при котором:

- суммарная интегральная доза будет минимальной;
- маршрут начинается в начальной точке и заканчивается в конечной;
- при необходимости, маршрут проходит через заранее заданные промежуточные точки;
- не допускается проход через ячейки, помеченные как непроходимые (стены, оборудование, технические зоны и т.п.).

Архитектура программной системы построена по принципу модульной декомпозиции, при котором каждая функциональная задача реализуется отдельным логическим блоком, и состоит из моделей пользовательского интерфейса (ввод параметров, отображение результатов), интерполяции поля (построение радиационной карты помещения), алгоритмического (построение маршрутов с помощью алгоритма А* и итерационного алгоритма Беллмана), расчета дозы, визуализации (отображение радиационной карты, препятствий, построенных маршрутов).

Данные по рассматриваемому помещению (рис. 1, табл. 1) были адаптированы с учетом условий использования их в программе (учитывается ячейка сетки $0,2 \times 0,2$ м, препятствия были перенесены на сетку с помощью окна ввода препятствий).

На итоговых визуализациях маршрутов отчетливо видны различия в поведении алгоритмов (рис. 2).

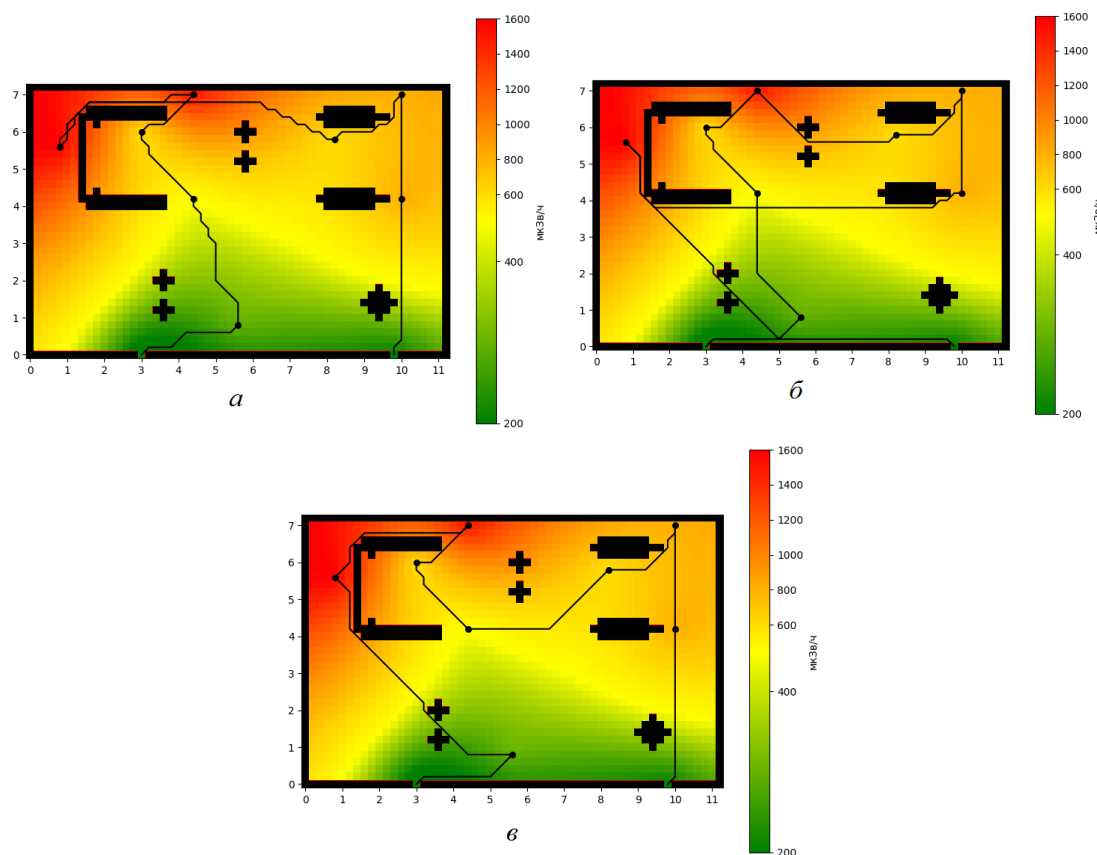


Рисунок 2. Визуализация маршрутов: а – произвольный маршрут; б – оптимальный, определенный с помощью алгоритма А*; в – оптимальный, определенный с помощью итерационного алгоритма на основе уравнения Беллмана

Figure 2. Visualization of routes: a – random route; b – optimal route determined using the A* algorithm; c – optimal route determined using an iterative algorithm based on Bellman's equation

Преимущества алгоритма А* являются высокая скорость поиска, а также возможность управления балансом между скоростью и точностью через эвристику. Недостатки алгоритма:

- результат может не быть строго оптимальным;
- качество решения зависит от выбранной эвристической функции;
- не всегда подходит для задач с высокой сложностью поля стоимости.

Так как алгоритм А* использует жадную стратегию: он выбирает ближайшую следующую промежуточную точку, это приводит к появлению петель, возвратов.

Алгоритм на основе уравнения Беллмана – динамическое программирование – отли-

чается не только методом расчета, но и подходом к выбору порядка обхода точек [3],[12]. Он перебирает все возможные последовательности промежуточных точек и оценивает дозу для каждого маршрута, выбирая среди них оптимальный с точки зрения суммарной дозы. Таким образом, алгоритм Беллмана нашел глобально оптимальный маршрут.

Как следует из полученных результатов оптимизации маршрутов при регламентных работах в помещении (рис.3), алгоритм А* дает снижение дозовых затрат на перемещение оператора на 1 %, а метод динамического программирования – на 14,5 % по сравнению с произвольным маршрутом.

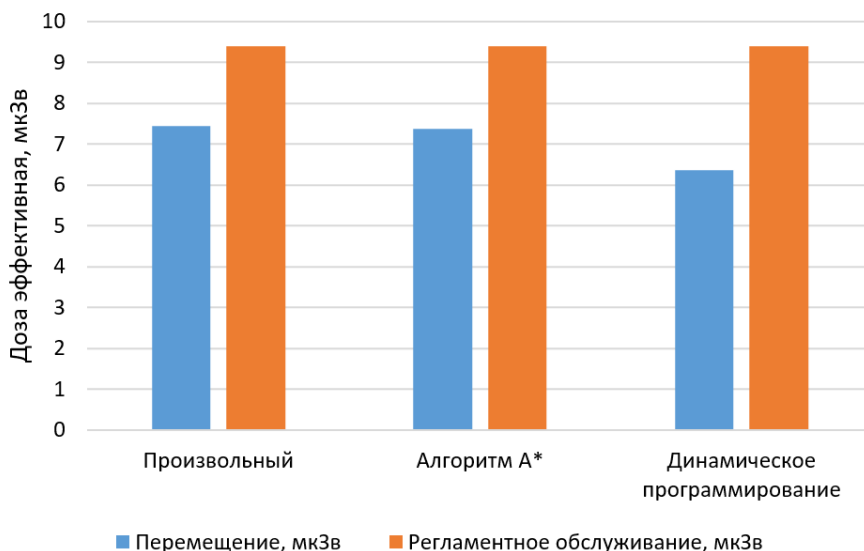


Рисунок 3. Дозовые затраты на регламентное обслуживание и перемещение в помещении
Figure 3. Dose costs for routine maintenance and indoor movement

Поскольку произвольный маршрут может быть близок к оптимальному и наоборот, для оценки эффективности нахождения оптимального пути, соответствующего минимальным дозам, был проведен расчет максимальных дозовых затрат на перемещение с посещением всех 10 точек. Как показывают результаты, максимальные дозовые затраты на перемещение, определенные с помощью алгоритма А* на 53,8%, а метода динамического программирования – на 81,6% больше, чем при найденных с помощью соответствующих алгоритмов поиска оптимальных маршрутов.

Заключение

Разработанные алгоритмы поиска оптимального пути перемещения в неоднородных радиационных полях с учетом обхода препятствий позволяют минимизировать дозовые затраты персонала и могут использоваться на АЭС, а также других радиационно-опасных объектах. Система обеспечивает гибкость конфигурации, визуализацию маршрутов и возможность интеграции в более широкие системы мониторинга.

Оптимальный маршрут оператора может быть обозначен нанесением на пол помещения линий или реперных точек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Mikhailova A.F., Tashlykov O.L. The ways of implementation of the optimization principle in the personnel radiological protection. *Physics of atomic nuclei*. 2024;83:1718–1726. <https://doi.org/10.1134/S1063778820100154>
2. Ташлыков О.Л. Дозовые затраты персонала в атомной энергетике. Анализ. Пути снижения. Оптимизация. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. RG, 2011. 232 с. ISBN: 978-3-8443-5472-0
Tashlykov O.L. Dose costs of personnel in nuclear power engineering. Analysis. Ways of reduction. Optimization. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. RG, 2011; 232 p. (in Russ.). ISBN: 978-3-8443-5472-0
3. Коробкин В. В., Сесекин А. Н., Ташлыков О. Л., Ченцов А. Г. Методы маршрутизации и их приложения в задачах повышения безопасности и эффективности эксплуатации атомных станций. Москва: Новые технологии, 2012. 234 с. ISBN: 978-5-94694-027-6
Korobkin V.V., Sesekin A.N., Tashlykov O.L., Chentsov A.G. Routing methods and their applications in improving the safety and efficiency of nuclear power plant operation. Moscow: New Technologies Publishing House, 2012. 234 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-94694-027-6
4. Кропачев Ю.А., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Оптимизация радиационной защиты на этапе вывода энергоблоков АЭС из эксплуатации. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2019;(1):119–130. <https://doi.org/10.26583/npe.2019.1.11>
Kropachev Y.A., Tashlykov O.L., Shcheklein S.E. Optimization of radiation protection at the stage of nuclear power plant units decommissioning. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2019;(1):119–130. (in Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2019.1.11>
5. Кропачев Ю.А., Ташлыков О.Л., Сесекин А.Н., Щеклеин С.Е., Хомяков А.П. Подсистема автоматизированной обработки данных нерегулярных измерений радиационной обстановки. *Ядерная и радиационная безопасность*. 2019;3(93):26–35. <https://doi.org/10.26277/SECNRS.2019.93.3.003>
Kropachev Y.A., Tashlykov O.L., Shcheklein S.E. Subsystem for automated processing of non-routine radiation measurements. *Yadernaya i radiacionnaya bezopasnost'*. 2019;3(93):26–35. (in Russ.). <https://doi.org/10.26277/SECNRS.2019.93.3.003>
6. Tashlykov O.L., Grigoryev A.M., Kropachev Y.A. Reducing the exposure dose by optimizing the route of personnel movement when visiting specified points and taking into account the avoidance of obstacles. *Energies*. 2022;15(21):11. <https://doi.org/10.3390/en15218222>
7. Grigoryev A.M., Tashlykov O.L. Solving a routing optimization of works in radiation fields with using a supercomputer. *AIP Conference Proceedings*. 2019;020028; <https://doi.org/10.1063/1.5055101>
8. Завадский Д.И., Ташлыков О.Л. Возможности использования ТИМ в атомной энергетике (на примере АЭС с энергоблоком БН-600). *Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений*. 2023;6-2(67):65–70. Режим доступа: https://ptrbs.ru/2023_6-1.php?ysclid=mfdh3o3583375769388 (дата обращения: 09.06.2025)
Zavadskii D.I., Tashlykov O.L. The role of virtual technologies in the optimization of radiation protection of personnel (by the example of NPP unit with BN-600). *Prirodnye i tehnogennye riski. Bezopasnost' sooruzhenij*. 2023;6-2(67):65–70 (in Russ.). Available at: https://ptrbs.ru/2023_6-1.php?ysclid=mfdh3o3583375769388 (accessed: 09.06.2025)
9. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Опыт подготовки специалистов для атомной отрасли в Уральском федеральном университете «через науку». *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2024;4:202–218. <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.17>
Tashlykov O.L., Shcheklein S.E. Experience of «via science» personnel training for nuclear industry at the Ural Federal University. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024;4:202–218. (in Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.17>
10. Grigoryev A.M., Tashlykov O.L. Solving a routing optimization of works in radiation fields with using a supercomputer. *AIP Conference Proceedings* 2015. 2018. 020028. <https://doi.org/10.1063/1.5055101>
11. Татарских Д. А., Завадский Д.И., Сесекин А. Н., Ташлыков О. Л. Универсальная программа построения маршрута перемещения дозиметриста в помещениях АЭС с целью минимизации суммарной дозы облучения. Физика. Технологии. Инновации. ФТИ–2025. Тезисы докладов XII Международной молодежной научной конференции. Екатеринбург: УрФУ. 2025. С. 71–72. Режим доступа: https://fizteh.urfu.ru/fileadmin/user_upload/site_19855/Conference/2025/Sbornik_tezisov_konferencii_FTI-2025.pdf (дата обращения: 09.06.2025).
Tatarskikh D.A., Zavadskii D.I., Sesekin A.N., Tashlykov O.L. A universal program for planning the route of a dosimetrist's movement within nuclear power plant premises with the aim of minimizing the total radiation dose. *Fizika. Tekhnologii. Innovacii. FTI–2025. XII Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferenciya*. Yekaterinburg: UrFU. 2025. P. 71–72. (in Russ.). Available at: https://fizteh.urfu.ru/fileadmin/user_upload/site_19855/Conference/2025/Sbornik_tezisov_konferencii_FTI-2025.pdf (accessed: 08.08.2025).

12. Tashlykov O.L., Sesekin A.N., Chentsov A.G., Chentsov A.A. Development of methods for route optimization of work in inhomogeneous radiation fields to minimize the dose load of personnel. *Energies*. 2022;15(13):4788. 11 p. <https://doi.org/10.3390/en15134788>
13. Сесекин А.Н., Ченцов А.А., Ченцов А.Г. Задачи маршрутизации перемещений. Санкт-Петербург. Лань. 2022. 240 с. ISBN: 978-5-8114-9999-1
- Sesekin A.N., Chentsov A.G., Chentsov A.A. Routing tasks for movements: a textbook for universities. SpB.: Lan', 2022. 240 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-8114-9999-1
14. Bishop C.M. Pattern recognition and machine learning. New York: Springer, 2006. 738 p. Available at: <https://link.springer.com/book/9780387310732> (accessed: 08.08.2025).
15. Grigoryev A.M., Tashlykov O.L., Popel A.A., Kropachev Yu.A. Determination of radiation field parameters for the problems of routing optimization based on interpolation with radial basis functions. AIP Conference Proceedings 2020;2313. <https://doi.org/10.1063/5.0032248>
16. Wilson R.J. Introduction to Graph Theory. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1972. Available at: <https://webhomes.maths.ed.ac.uk/~v1ranick/papers/wilsongraph.pdf> (accessed: 08.08.2025).
17. Ларичев О.И. Вербальный анализ решений. Москва: Наука, 2006. 181 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_002862845/ (дата обращения: 08.08.2025).
- Larichev O.I. Verbal Decision Analysis. Moscow: Nauka, 2006. 181 p. (in Russ.). Available at: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_002862845/ (accessed: 08.08.2025).
18. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 1968; 4(2):100–107. <https://doi.org/10.1109/TSSC.1968.300136>
19. Большакова Е. И., Мальковский М. Г., Пильщиков В. Н. Искусственный интеллект. Алгоритмы эвристического поиска: учебное пособие. М.: Изд-во факультета ВМК МГУ, 2002. 83 с. ISBN 5-89407-150-X. Режим доступа: <https://rusist.info/book/386838> (дата обращения: 14.09.2025).
- Bolshakova E.I., Malkovskii M.G., Pilshchikov V.N. Artificial Intelligence. Algorithms of heuristic search: textbook. Moscow: Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University Publishing House; 2002. 83 p. ISBN 5-89407-150-X. (in Russ.). Available at: <https://rusist.info/book/386838> (accessed: 14.09.2025).
20. Junhao Zhang, Weiwei Chen, Bingyu Ni, Jing Zheng, Kaixin Zhao, Wanyi Tian, Chao Jiang. Optimization of Personnel Work Paths During Decommissioning of Nuclear Facilities. *Nuclear Science and Engineering* 2024;198(8):1668-1681. <https://doi.org/10.1080/00295639.2023.2257508>
21. Nour AbuJaba, Mohammed Baziyad, Raouf Fareh, Brahim Brahmi, Tamer Rabie, Maamar Bettayeb. A Comprehensive Study of Recent Path-Planning Techniques in Dynamic Environments for Autonomous Robots. *Sensors*. 2024;24(24):8089. <https://doi.org/10.3390/s24248089>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Ташлыков О.Л. – руководитель, разработка методологии исследований, редактирование;

Сесекин А.Н. – руководитель, разработка методологии исследований, редактирование.

Татарских Д.А. – написание первоначального варианта; разработка алгоритмов и программы для моделирования, проверка устойчивости расчетной системы.

Завадский Д.И. – сбор исходных данных по радиационным и геометрическим характеристикам исследуемого объекта (помещения АЭС) для постановки задачи, построение 3D-моделей, обработка, верификация результатов и их графическая визуализация, оформление рукописи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Tashlykov O.L. – Head, development of research methodology, editing.

Sesekin A.N. – Head, development of research methodology, editing.

Tatarskikh D.A. – writing the initial version; development of algorithms and simulation software, checking for stability of the settlement system.

Zavadskii D.I. – designing of initial data on the radiation and geometric characteristics of the object under study (NPP premises), designing 3D-models, handling, verification of results and their graphical visualization, manuscript formatting.

FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Олег Леонидович Ташлыков, доктор технических наук, профессор, Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-6397-015X>

e-mail: o.l.tashlykov@urfu.ru

Александр Николаевич Сесекин, доктор физико-математических наук, профессор, Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-1339-9044>

e-mail: sesekin@list.ru

Дарья Александровна Татарских, магистр, Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация.

e-mail: tatarskikh.dasha@gmail.com

Даниил Игоревич Завадский, аспирант, Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация.

e-mail: danilezavadsky@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Oleg L. Tashlykov, Dr. Sci. (Engin), Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-6397-015X>

e-mail: o.l.tashlykov@urfu.ru.

Alexander N. Sesekin, Dr. Sci. (Phys. Math.), Professor Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-1339-9044>

e-mail: sesekin@list.ru

Daria A. Tatarskikh, Master, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation.

e-mail: tatarskikh.dasha@gmail.com

Daniil I. Zavadskii, post-graduate student, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation.

e-mail: danilezavadsky@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 20.06.2025

После доработки / Revision 25.08.2025

Принята к публикации / Accepted 02.09.2025

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-2025-03-03>

EDN HJDXDQ

Оригинальная статья / Original paper



Применение кода OpenMC для бенчмарка ВВЭР-1000 со смешанной
загрузкой уранового и МОКС-топлива

Д.А. Плотников , В.И. Романенко , Д.А. Соловьев , В.Г. Зимин , И.А. Молев ,
В.Н. Кудратов , С.В. Ивахин , Б. Джарум

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

DASolovev@mephi.ru

Аннотация. В данной работе представлены результаты численного моделирования бенчмарка реактора ВВЭР-1000 со смешанной загрузкой уранового и МОКС-топлива, разработанного Агентством по Ядерной Энергии при Организации Экономического Сотрудничества и Развития (АЯЭ ОЭСР), с помощью программного комплекса OpenMC. OpenMC предназначен для моделирования процессов переноса нейтронов методом Монте-Карло и использует в качестве программного интерфейса язык программирования Python. Нейтронные сечения для различных нуклидов, необходимые для проведения расчетов, были получены с помощью баз оцененных ядерных данных ENDF/B-VII.1 и ENDF/B-VIII.0. Использование двух версий библиотек позволили провести оценку влияния выбора базы ядерных данных на ключевые нейтронно-физические параметры ВВЭР-1000. Рассчитанные значения эффективного коэффициента размножения и скорости реакции деления в тепловыделяющих сборках для различных стационарных состояний реактора ВВЭР-1000 были сопоставлены с результатами, полученными с помощью кодов MCU, RADAR и MCNP (опубликованными АЯЭ ОЭСР и, в частности, сотрудниками Агентства по Атомной Энергии Турции). Дополнительно была проведена кросс-верификация полученных результатов, для чего была построена расчетная модель бенчмарка ВВЭР-1000 с помощью кода Serpent. Полученные результаты демонстрируют хорошую сходимость с результатами других прецизионных кодов и подтверждают корректность построенных в OpenMC и Serpent расчетных моделей. Работа подтверждает возможность использования OpenMC для точного моделирования нейтронно-физических характеристик ВВЭР-1000, что актуально для задач проектирования и анализа безопасности современных ядерных энергетических установок. Методология, реализованная в данной работе, может быть использована для последующего моделирования и анализа новых конфигураций активных зон различных реакторных установок.

Ключевые слова: OpenMC, Serpent, ВВЭР-1000, метод Монте-Карло, моделирование, перенос нейтронов.

Для цитирования: Плотников Д.А., Романенко В.И., Соловьев Д.А., Зимин В.Г., Молев И.А., Кудратов В.Н., Ивахин С.В., Джарум Б. Применение кода OpenMC для бенчмарка ВВЭР-1000 со смешанной загрузкой уранового и МОКС-топлива. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(3):26–35. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-03>

For citation: Plotnikov D.A., Romanenko V.I., Solovyev D.A., Zimin V.G., Molev I.A., Kudratov V.N., Ivakhin S.V., Djaroum B. Application of OpenMC code to VVER-1000 MOX Core computational benchmark. *Nuclear Safety*. 2025; 15(3):26–35. (In Rus.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-03>

Application of OpenMC code to VVER-1000 MOX Core computational benchmark

Denis A. Plotnikov , Vladislav I. Romanenko , Denis A. Solovyev ,
Vyacheslav G. Zimin , Ilya A. Molev , Voxid N. Kudratov , Sergey V. Ivakhin ,
Belaid Djaroum

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation

DASolovev@mephi.ru

Abstract. This paper presents the results of numerical modeling of the VVER-1000 benchmark with a mixed loading of uranium and MOX fuel, developed by the Nuclear Energy Agency of the Organisation for Economic Co-operation and Development (NEA OECD), using the OpenMC code. OpenMC is a Monte Carlo-based neutron transport simulation code that employs Python as a user interface. The neutron cross sections for various nuclides required for the calculations are obtained from the ENDF/B-VII.1 and ENDF/B-VIII.0 evaluated nuclear data libraries. The use of two different nuclear data versions made it possible to assess the sensitivity of key neutronic parameters of the VVER-1000 reactor to the choice of cross-section libraries. Calculated values of the effective multiplication factor and fission reaction rates in the fuel assemblies for several stationary reactor states are compared with benchmark results obtained using MCU, RADAR, and MCNP codes (published by the NEA OECD and, in particular, by researchers from the Turkish Atomic Energy Authority). Additionally, a cross-verification of the results is carried out using an independent model of the VVER-1000 benchmark developed in the Serpent code. The results demonstrate good agreement with other high-precision codes and confirm the correctness of the OpenMC and Serpent models. The presented methodology is applicable for further modeling and analysis of new core configurations in various reactor systems.

Keywords: OpenMC, Serpent, VVER-1000, Monte Carlo method, modeling, neutron transport.

Введение

Расчетное моделирование процессов, протекающих в различных ядерных установках, является одной из наиболее важных задач по развитию конкурентоспособности ядерной энергетики на мировой арене, так как позволяет прогнозировать поведение ядерных установок в различных условиях и оценивать их безопасность и эффективность. Для проведения таких расчетов в настоящее время разработаны различные программные комплексы, например, такие, как MCU [1], MCNP [2] и пр. Для того, чтобы оценить насколько корректно и точно производят расчеты разработанные программы используются тесты, результаты которых получены с высокой точностью. Данные тесты называются бенчмарк-тестами или бенчмарками.

Целью данной работы является проверка качества разработанной в коде OpenMC [3] модели активной зоны совместно с выгородкой и корпусом для реактора ВВЭР-1000.

Для решения этой задачи была выполнена серия расчетов состояний модели, приведенной в бенчмарке VVER-1000 MOX Core Computational Benchmark [4]. Результаты данных расчетов будут представлены ниже. Расчеты выполнены по кодам OpenMC и Serpent [5]. Serpent используется для дополнительной кросс-верификации полученных результатов.

Используемые программы

Одним из программных комплексов, осуществляющих прецизионные расчеты ядерных установок методом Монте-Карло, является программный комплекс OpenMC,

разработанный Массачусетским Технологическим Институтом в 2011 г.

OpenMC представляет собой код моделирования переноса нейтронов методом Монте-Карло с программным интерфейсом на языке программирования Python. OpenMC доступен в виде бесплатного программного обеспечения под лицензией с открытым исходным кодом, что позволяет использовать его на международном уровне и расширить сотрудничество с сообществом специалистов в области ядерной науки и техники [3]. Результаты применения данного программного комплекса для решения различных нейтронно-физических задач были неоднократно опубликованы (например, в работе [6]).

Комплекс трехмерных программ Serpent разработан техническим исследовательским центром Финляндии и используется для расчета переноса частиц методом Монте-Карло с непрерывной энергетической зависимостью нейтронов. Работы по его созданию начались в 2004 г. Сам код был загружен в OECD/NEA (the Organization for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency) и RSICC (Radiation Safety Information Computational Center) в 2009 году. Serpent позволяет выполнять расчеты коэффициента размножения нейтронов, нуклидного состава и ряда других параметров систем, содержащих ядерные делящиеся материалы. Код Serpent разработан таким образом, чтобы повысить скорость расчета за счет использования больших объемов оперативной памяти. Код предназначен для некоммерческого использования.

Описание бенчмарк-эксперимента ВВЭР-1000

В качестве исходных данных для проведения расчетов использовались данные, которые приведены в описании расчетного бенчмарк-теста, разработанного Агентством по Ядерной Энергии при Организации Экономического Сотрудничества и Развития (АЯЭ ОЭСР) [4].

В этом бенчмарк-тесте представлено описание двухмерной модели активной зоны реактора ВВЭР-1000 со смешанной загрузкой уранового и МОКС-топлива. В модели используется 2 типа тепловыделяющих сборок – тепловыделяющие сборки с урановым топливом, содержащие ТВЭГ с гадолинием в качестве выгорающего поглотителя, и профилированные тепловыделяющие сборки с МОКС-топливом, также содержащие ТВЭГ с гадолинием. При этом тепловыделяющие сборки имеют различные глубины выгорания. Представленная модель активной зоны имеет 60° симметрию. Схематичное изображение модели представлено на рисунке 1.

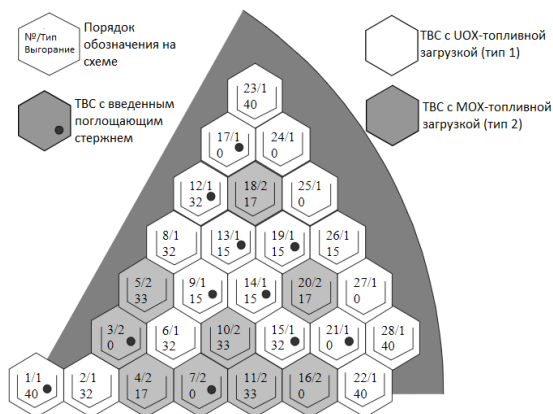


Рисунок 1. Расчетная модель со смешанной загрузкой уранового и МОКС-топлива [4]

Figure 1. Computational model with mixed uranium and MOX fuel loading [4]

Активная зона реактора, как указано на рисунке 2, окружена следующими слоями отражателя (по порядку от центра к периферии): водяной зазор, стальная выгородка с отверстиями для отвода тепла, стальная внутриреакторная шахта, опускной участок, стальной корпус реактора. В активной зоне расположены 163 тепловыделяющие сборки, каждая из которых состоит из 331 шести-

гранной ячейки (ТВЭЛы различного обогащения, ТВЭГ, направляющие трубки, центральная трубка). Подробное описание модели (геометрические размеры, материальный состав, температуры и пр.) представлено в описании бенчмарк-теста.

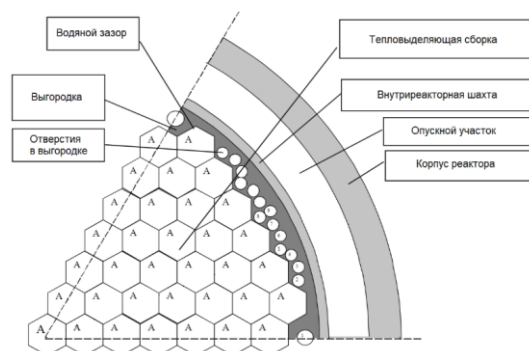


Рисунок 2. Расположение конструктивных элементов реактора в расчетной модели [4]

Figure 2. Layout of reactor structural components in the computational model [4]

Схематичные изображения тепловыделяющих сборок представлены на рисунке 3 (тепловыделяющая сборка с урановым топливом. Обозначение: 1 – Центральная трубка, 2 – ТВЭЛ с обогащением 4,2 % по ^{235}U , 3 – Направляющая трубка, 4 – ТВЭГ с обогащением 3,3 % по ^{235}U и 5 % по Gd_2O_3 , 5 – ТВЭЛ с обогащением 3,7 % по ^{235}U , 7 – Замедлитель [4]) и рисунке 4 (тепловыделяющая сборка с МОКС-топливом. Обозначение: 1 – Центральная трубка, 2 – ТВЭЛ с обогащением 3,62 % по энергетическому плутонию (материал PU_3.6 из [5]), 3 – Направляющая трубка, 4 – ТВЭГ с обогащением 3,6 % по ^{235}U и 4 % по Gd_2O_3 , 5 – ТВЭЛ с обогащением 2,7 % по энергетическому плутонию (материал PU_2.7 из [5]), 6 – ТВЭЛ с обогащением 2,4 % по энергетическому плутонию (материал PU_2.4 из [5]), 7 – Замедлитель [4]). Всего в бенчмарк-тесте рассчитано 6 различных состояний активной зоны реактора. Краткое описание расчетных состояний представлено в таблице 1.

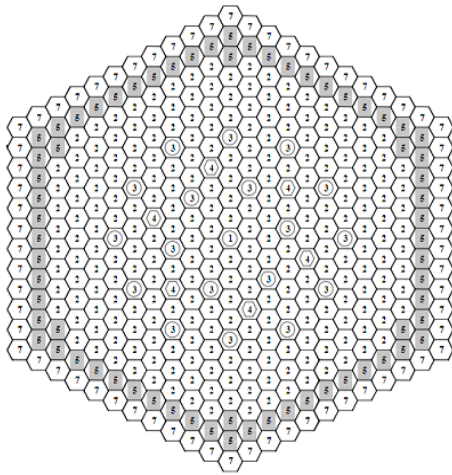


Рисунок 3. Схематичное изображение тепловыделяющей сборки с урановой топливной загрузкой.

Figure 3. Schematic diagram of a fuel assembly with uranium fuel loading.

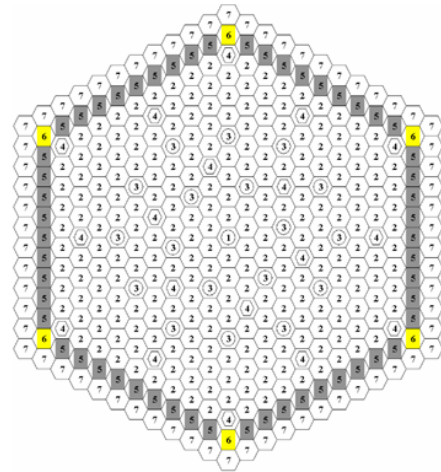


Рисунок 4. Схематичное изображение тепловыделяющей сборки с МОКС-топливной загрузкой.

Figure 4. Schematic diagram of a fuel assembly with MOX fuel loading.

Таблица 1. Описание расчетных состояний реактора ВВЭР-1000

Table 1. Description of the calculated states of the VVER-1000 reactor

Номер состояния	Наименование состояния	Температура топлива, К	Температура воды в ТВС, К	Температура в отражателе, К
1	Рабочее состояние	1027	575	560
2	Состояние с постоянной температурой	575	575	560
3	Холодное состояние с бором	300	300	300
4	Рабочее состояние без бора	1027	575	560
5	Состояние без бора с постоянной температурой	575	575	560
6	Состояние с введенными стержнями АЗ	553	553	553

Результаты расчетов

Расчет данного бенчмарк-теста неоднократно проводился для верификации различных программных средств (например, подобные исследования проводились сотрудниками Агентства по Атомной Энергии Турции и опубликованы в работе [7]).

В нашей работе были проведены расчеты по *OpenMC* и *Serpent*. При этом данные нейтронных сечений нуклидов были получены с помощью баз оцененных ядерных данных *ENDF/B-VII.1* и *ENDF/B-VIII*.

В таблице 2 представлены значения эффективного коэффициента размножения по всем стационарным состояниям реактора из таблицы 1. Отметим, что в работе [7] не представлены результаты для стационарного состояния №6 с введенными стержнями аварийной защиты. В данном бенчмарк-тесте опубликованы значения эффективного коэффициента размножения, полученные с помощью программных комплексов *MCU*

(база ядерных данных *MCUDAT-2.2*), *RADAR* (63-групповая библиотека с 40 тепловыми группами с границей в 1 электрон-вольт), *MCNP4C* (база ядерных данных *JEF 2.2*). В работе [7] опубликованы значения эффективного коэффициента размножения, полученные с помощью программного комплекса *MCNP5* (база ядерных данных *ENDF/B-VI.6*). Эти результаты использованы нами для сравнения с результатами, полученными по *OpenMC* и *Serpent*. При этом стандартное отклонение при расчете эффективного коэффициента размножения для различных состояний, полученных по *OpenMC*, не превышает 0,017 %, а для результатов, полученных по *Serpent*, не превышает 0,016%.

Для расчета состояний по *OpenMC* использовались статистики из бенчмарк-теста, а именно: для расчета первого состояния были взяты следующие параметры: 2×10^4 нейтронов в одном поколении нейтронов,

5×10^3 нейтронных поколений, 50 первых нейтронных поколений не учитываются при расчете функционалов. Для расчета оставшихся пяти состояний использовались следующие параметры: 2×10^4 нейтронов в одном поколении нейтронов, 2×10^3 нейтронных поколений, 500 первых нейтронных поколений не учитываются при расчете функционалов.

Для расчета состояний по *Serpent* использовались следующие параметры: 10^6 историй нейтронов в одном поколении, 100 нейтронных поколений, 20 первых нейтронных поколений не учитываются при расчете функционалов.

В таблице 3 представлены относительные отклонения эффективного коэффициента размножения от значений, полученных с помощью *MCU* (база ядерных данных *MCUDAT-2.2*), принятых за «эталонные» и представленных в бенчмарк-тесте. Именно эти результаты приняты за эталон, поскольку бенчмарк разрабатывался в НИЦ «Курчатовский институт», и основным расчетным средством в данном бенчмарке является программа *MCU*. Для проведенных по *OpenMC* расчетам, полученные отклонения от *MCU* не превышают 1 %.

Таблица 2. Значения эффективного коэффициента размножения (*Кэфф*) для различных состояний реактора
Table 2. Effective multiplication factor values (*Keff*) for different reactor states

Расчетный код	Номера состояния					
	1	2	3	4	5	6
<i>OpenMC</i> _{ENDF/B-VII.1}	1,04087	1,05478	0,93470	1,14302	1,15885	1,04861
<i>OpenMC</i> _{ENDF/B-VIII.0}	1,04127	1,05503	0,93427	1,14325	1,15856	1,04802
<i>Serpent</i> _{ENDF/B-VII.1}	1,03794	1,05150	0,93427	1,13919	1,15456	1,04747
<i>Serpent</i> _{ENDF/B-VIII.0}	1,03800	1,05174	0,93407	1,13907	1,15466	1,04746
<i>MCU</i> [5]	1,03341	1,04719	0,93237	1,14932	1,14932	1,04267
<i>RADAR</i> [5]	1,03769	1,05117	0,93204	1,14081	1,15574	N/A
<i>MCNP4C</i> [5]	1,03770	1,05132	0,93416	1,13871	1,15400	1,04729
<i>MCNP5</i> [6]	1,03614	1,04339	0,93397	1,13511	1,14333	1,03914

Таблица 3. Относительные отклонения эффективного коэффициента размножения для различных состояний реактора от значений, полученных с помощью *MCU*

Table 3. Relative deviations of the effective multiplication factor for different reactor states from the values obtained using *MCU*

Расчетный код	Номера состояния					
	1	2	3	4	5	6
$(OpenMC_{ENDF/B-VII.1}-MCU) / MCU, \%$	0,722	0,725	0,250	-0,548	0,829	0,570
$(OpenMC_{ENDF/B-VIII.0}-MCU) / MCU, \%$	0,761	0,749	0,204	-0,528	0,804	0,513
$(Serpent_{ENDF/B7.1}-MCU) / MCU, \%$	0,438	0,412	0,204	-0,881	0,456	0,460
$(Serpent_{ENDF/B8.0}-MCU) / MCU, \%$	0,444	0,434	0,182	-0,892	0,464	0,459
$(RADAR-MCU) / MCU, \%$	0,414	0,380	-0,035	0,740	0,559	N/A
$(MCNP4C-MCU) / MCU, \%$	0,415	0,394	0,192	-0,923	0,407	0,443
$(MCNP5-MCU) / MCU, \%$	0,264	-0,363	0,172	-1,234	-0,521	-0,339

При проведении расчетов с помощью *OpenMC* и *Serpent* были также получены средние значения скоростей реакции деления в тепловыделяющих сборках и относительные отклонения в процентах от значений, полученных по *MCU* (представлены на рисунках 5–10) для всех стационарных со-

стояний из таблицы 1. Полученные результаты сравниваются со средними значениями скоростей реакции деления в тепловыделяющих сборках, полученными с помощью разных прецизионных кодов, представленных в работах [4,7]. При этом на рисунках 5–10 тепловыделяющие сборки оди-

наковой конструкции и с одинаковыми глубинами выгорания обозначены одинаковым цветом.

К средней скорости деления в ТВС применяется следующее правило нормализации: значения скорости деления $R(I)$, $I = 1, 28$, нормированы на 163, где 163 является чис-

лом ТВС в реакторе, а 6 это число 60° секторов симметрии:

$$R(1) + 6 * \sum_{I=2}^{28} R(I) = 163$$

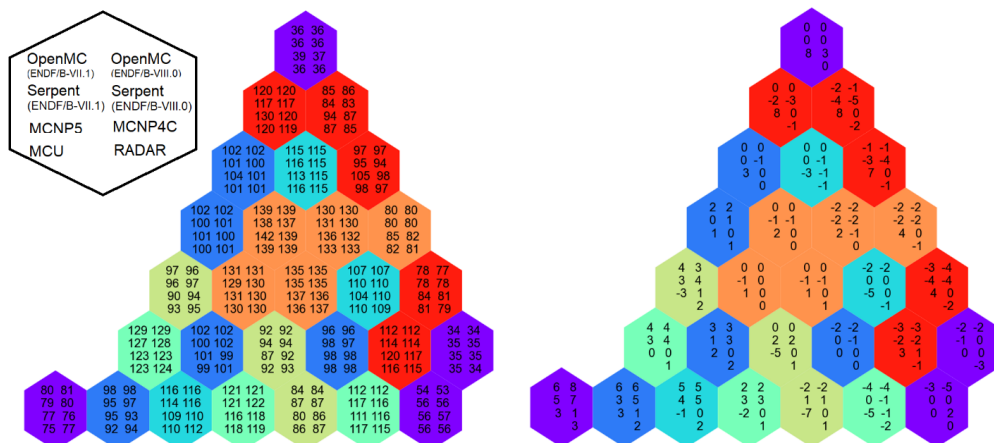


Рисунок 5. Средние значения скоростей реакции деления ($\times 100$) в тепловыделяющих сборках для разных прецизионных кодов и относительные отклонения в процентах от значений, полученных по MCU, для первого расчетного состояния из таблицы 1 (рабочее состояние)

Figure 5. Average fission reaction rates ($\times 100$) in fuel assemblies for different high-precision codes and relative deviations (in %) from MCU values for the first reactor state in Table 1 (operating state)

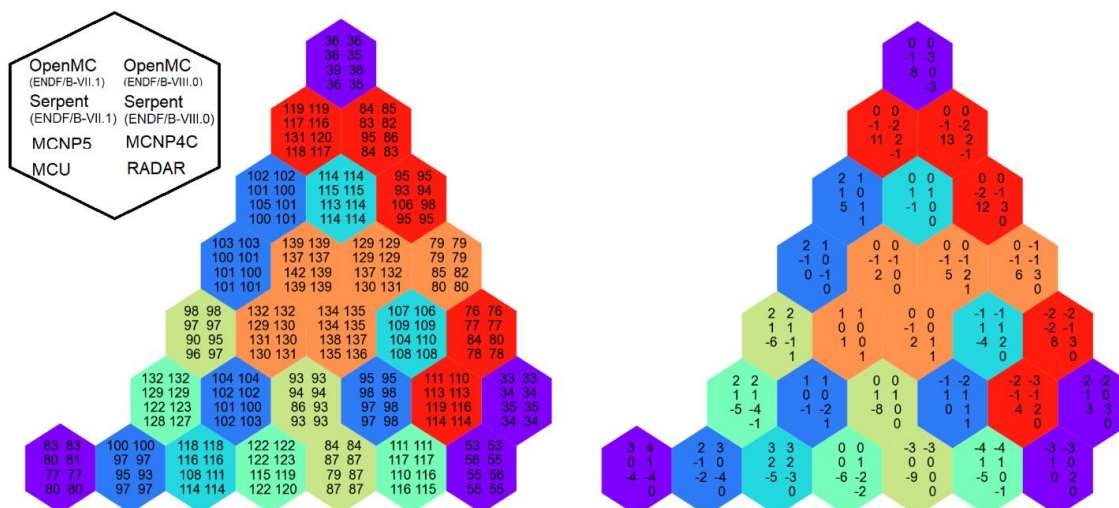


Рисунок 6. Средние значения скоростей реакции деления ($\times 100$) в тепловыделяющих сборках для разных прецизионных кодов и относительные отклонения в процентах от значений, полученных по MCU, для второго расчетного состояния из таблицы 1 (состояние с постоянной температурой)

Figure 6. Average fission reaction rates ($\times 100$) in fuel assemblies for different high-precision codes and relative deviations (in %) from MCU values for the second reactor state in Table 1 (constant temperature state)

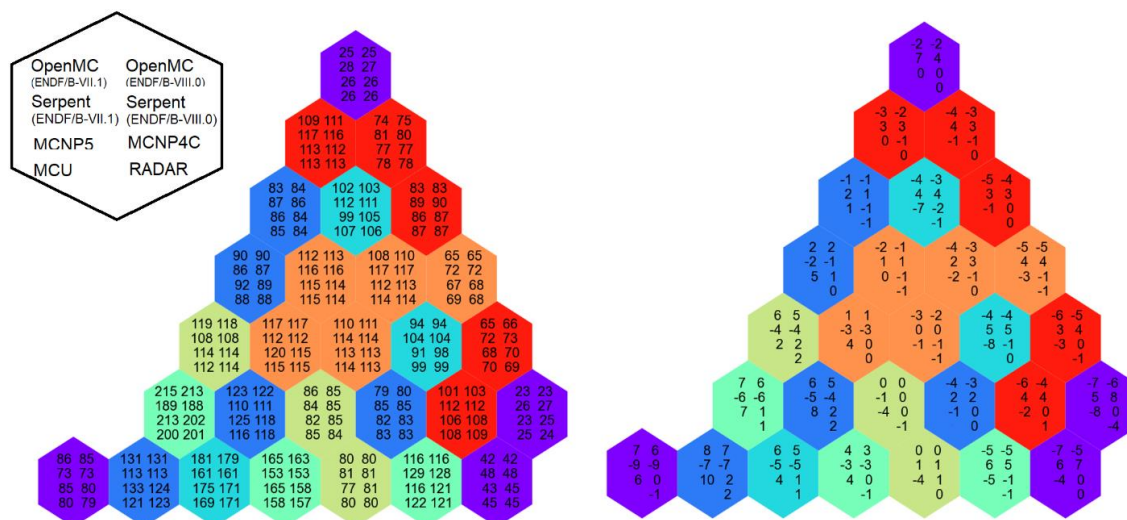


Рисунок 7. Средние значения скоростей реакции деления ($\times 100$) в тепловыделяющих сборках для разных прецизионных кодов и относительные отклонения в процентах от значений, полученных по MCU, для третьего расчетного состояния из таблицы 1 (холодное состояние с бором)

Figure 7. Average fission reaction rates ($\times 100$) in fuel assemblies for different high-precision codes and relative deviations (in %) from MCU values for the third reactor state in Table 1 (cold state with boron)

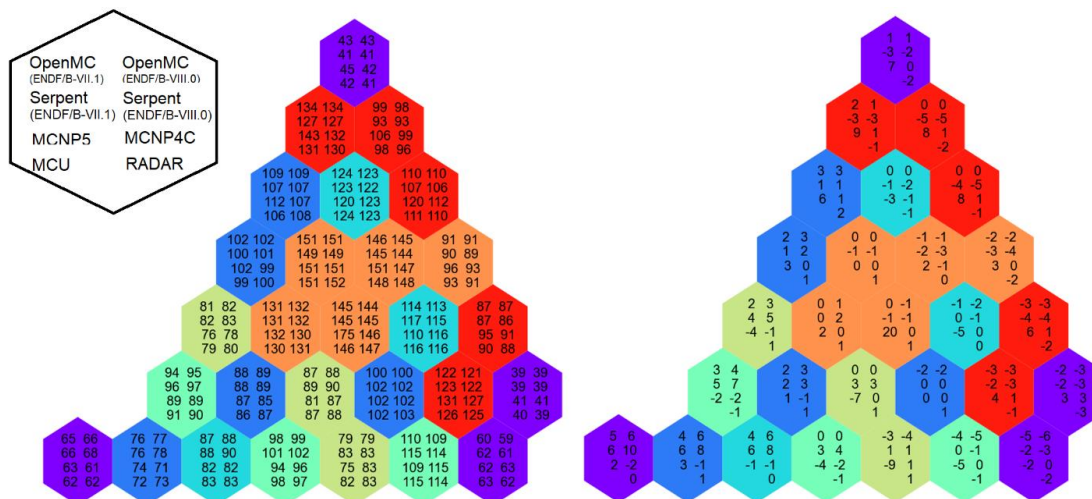


Рисунок 8. Средние значения скоростей реакции деления ($\times 100$) в тепловыделяющих сборках для разных прецизионных кодов и относительные отклонения в процентах от значений, полученных по MCU, для четвертого расчетного состояния из таблицы 1 (рабочее состояние без бора)

Figure 8. Average fission reaction rates ($\times 100$) in fuel assemblies for different high-precision codes and relative deviations (in %) from MCU values for the fourth reactor state in Table 1 (operating state without boron)

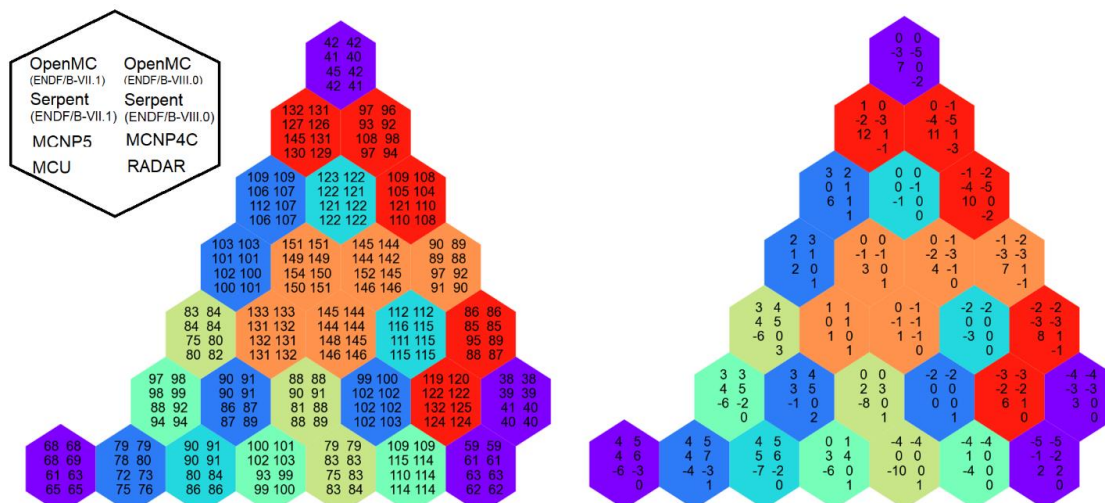


Рисунок 9. Средние значения скоростей реакции деления ($\times 100$) в тепловыделяющих сборках для разных прецизионных кодов и относительные отклонения в процентах от значений, полученных по MCU, для пятого расчетного состояния из таблицы 1 (состояние без бора с постоянной температурой)

Figure 9. Average fission reaction rates ($\times 100$) in fuel assemblies for different high-precision codes and relative deviations (in %) from MCU values for the fifth reactor state in Table 1 (constant temperature state without boron)

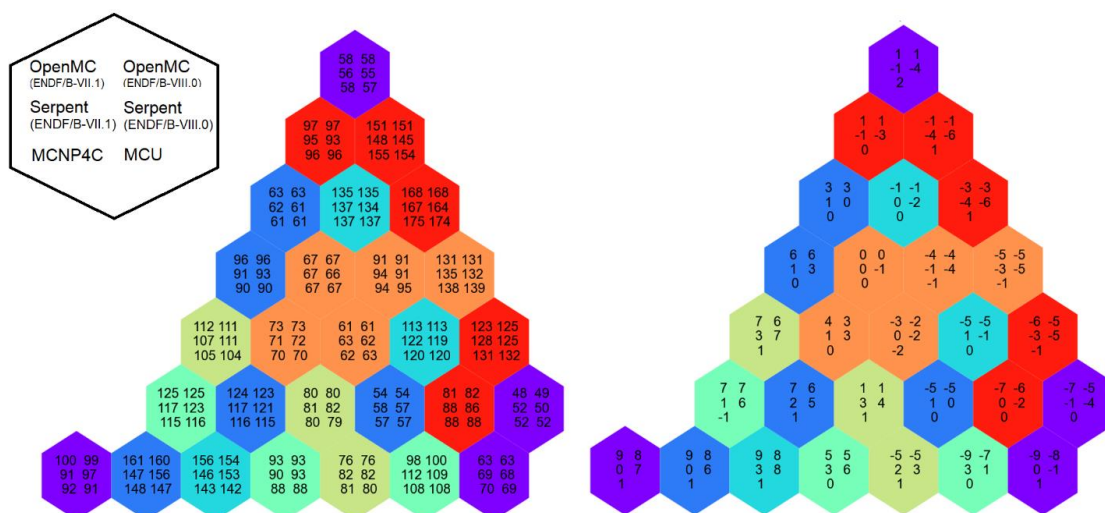


Рисунок 10. Средние значения скоростей реакции деления ($\times 100$) в тепловыделяющих сборках для разных прецизионных кодов и относительные отклонения в процентах от значений, полученных по MCU, для шестого расчетного состояния из таблицы 1 (состояние с введенными стержнями аварийной защиты).

Figure 10. Average fission reaction rates ($\times 100$) in fuel assemblies for different high-precision codes and relative deviations (in %) from MCU values for the sixth reactor state in Table 1 (state with inserted control rods)

Анализируя представленные данные по эффективным коэффициентам размножения и скоростям деления в ТВС можно сделать следующий вывод: результаты расчетов, полученные с применением кодов *OpenMC* и *Serpent*, показывают хорошее согласие с результатами расчетов, полученных по кодам *MCU*, *MCNP* и *RADAR*.

Выводы

Целью данной работы является проверка качества разработанной в коде *OpenMC* модели активной зоны, выгородки и корпуса для реактора ВВЭР-1000. Для этого был проведен расчет бенчмарк-теста по *OpenMC* и дополнительная кросс-верификация полученных результатов с помощью расчетной модели, построенной по *Serpent*. Данные о нейтронных сечениях были получены с помощью баз оцененных ядерных данных

ENDF/B-VII.1 и ENDF/B-VIII. В результате проведенных расчетов были получены значения эффективного коэффициента размножения и скоростей реакции деления в ТВС для стационарных состояний ВВЭР-1000,

приведенных в бенчмарк-тесте. Полученные по *OpenMC* результаты показывают, что разработанная модель активной зоны корректна и может быть использована для дальнейших работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Kalugin M.A., Oleinik D.S., Shkarovsky D.A. Overview of the MCU Monte Carlo Software Package. *Annals of nuclear energy*. 2015;82:54–62. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.032>
2. Briesmeister J.F. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C. Los Alamos National Laboratory, 2000. Technical Report LA-13709-M. Available at: https://mcnp.lanl.gov/pdf_files/TechReport_2000_LANL_LA-13709-M_Briesmeisterothers.pdf (accessed: 03.02.2025).
3. Romano P.K., Horelik N.E., Herman B.R., Nelson A.G., Forget B., Smith A.* OpenMC: A state-of-the-art Monte Carlo code for research and development. *Annals of Nuclear Energy*. 2015;82:90–97. <https://doi.org/10.1051/SNAMC/201406016>
4. Gomin E., Kalugin M., Oleynik D. VVER-1000 MOX Core Computational Benchmark: Specification and Results, NEA/NSC/DOC(2005)17. OECD, 2006. https://doi.org/10.1787/oecd_papers-v6-art12-en
5. Leppänen J. Serpent – A Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. *VTT Technical Research Centre of Finland*, 2015. Available at: https://serpent.vtt.fi/download/Serpent_manual.pdf (accessed: 07.02.2025).
6. Танаш Х.А., Соловьёв Д.А., Щукин Н.В., Зимин В.Г., Лобарев А.Л., Плотников Д.А. Выбор алгоритма выгорания в OpenMC на примере расчетного бенчмарка сборки LEU и MOX-топлива ВВЭР-1000. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;1(46):79–91. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-07>
7. Tanash H.A., Solovyov D.A., Zimin V.G., Lobarev A.L., Plotnikov D.A., Schukin N.V. Selecting Burnup Algorithms in OpenMC Using the Calculated Benchmark of LEU Assembly and MOX Fuel. *Physics of Atomic Nuclei*. 86, 2396–2404 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1063778823110431>
7. Şentürk Lüle S., Özdemir L., Erdoğan A. Application of CNUREAS and MCNP5 codes to VVER-1000 MOX Core Computational Benchmark. *Progress in Nuclear Energy*. 2015;85:454–461. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.07.007>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Плотников Д.А. – создание расчетной модели и проведение расчетов в OpenMC;
Романенко В.И. – создание расчетной модели и проведение расчетов в Serpent
Соловьёв Д.А. – создание расчетной модели и проведение расчетов в OpenMC;
Зимин В.Г. – постановка задачи и анализ литературных источников;
Молев И.А. – обработка результатов расчетов;
Кудратов В.Н. – обработка результатов расчетов;
Ивахин С.В. – подготовка исходных данных;
Джарум Б. – подготовка текста статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Денис Алексеевич Плотников, аспирант НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0000-0001-9387-170X>
 e-mail: pda1995@gmail.com

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Plotnikov D.A. – creation of a calculation model and OpenMC calculation;
Romanenko V.I. – creation of a calculation model and Serpent calculation;
Solovyev D.A. – creation of a calculation model and OpenMC calculation;
Zimin V.G. – statement of the problem and analysis of literary sources;
Molev I.A. – processing of calculation results;
Kudratov V.N. – processing of calculation results;
Ivaxin S.V. – preparation of input data;
Djaroum B. – preparation of the article text.

FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare no conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Denis A. Plotnikov, Postgraduate, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation.
<https://orcid.org/0000-0001-9387-170X>
 e-mail: pda1995@gmail.com

Владислав Игоревич Романенко, инженер НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0000-0002-8641-5885>
e-mail: romanenkovli@yandex.ru

Денис Алексеевич Соловьев, доцент НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0000-0002-0507-0839>
e-mail: vulture@inbox.ru

Вячеслав Геннадьевич Зимин, доцент НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0000-0002-0334-3741>
e-mail: vgzimin@mail.ru

Илья Александрович Молев, инженер НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0000-0001-7247-3040>
e-mail: iamolev@gmail.com

Вохид Насриддин угли Кудратов, аспирант НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0009-0006-4760-5877>
e-mail: vkudratov0727@gmail.com

Сергей Викторович Ивахин, аспирант НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0000-0003-0320-8950>
e-mail: sergey.ivakhin@gmail.com

Белади Джарум, аспирант НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0000-0002-1862-8838>
e-mail: bel.djarl11215@gmail.com

Vladislav I. Romanenko, Engineer, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation.
<https://orcid.org/0000-0002-8641-5885>
e-mail: romanenkovli@yandex.ru

Denis A. Solovyev, Assistant Professor, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation.
<https://orcid.org/0000-0002-0507-0839>
e-mail: vulture@inbox.ru

Vyacheslav G. Zimin, Assistant Professor, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation.
<https://orcid.org/0000-0002-0334-3741>
e-mail: vgzimin@mail.ru

Ilya A. Molev, Engineer, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation.
<https://orcid.org/0000-0001-7247-3040>
e-mail: iamolev@gmail.com

Voxid N. Kudratov, Postgraduate, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation.
<https://orcid.org/0009-0006-4760-5877>
e-mail: vkudratov0727@gmail.com

Sergey V. Ivakhin, Postgraduate, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation.
<https://orcid.org/0000-0003-0320-8950>
e-mail: sergey.ivakhin@gmail.com

Belaid Djaroum, Postgraduate, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation.
<https://orcid.org/0000-0002-1862-8838>
e-mail: bel.djarl11215@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 14.04.2025
После доработки / Revision 17.06.2025
Принята к публикации / Accepted 24.06.2025

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-2025-03-04>

EDN HYBNZY

Оригинальная статья / Original paper



Автоматизация диагностики оборудования АС с помощью искусственных нейронных сетей

А.Ю. Ченцова , Н.Ю. Шапошникова, И.А. Микшин , Е.В. Воробьев 

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

 elkit2004@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема автоматизации диагностики оборудования атомных станций для повышения его надежности и безопасности. Предлагается метод обнаружения течей трубопроводной арматуры на основе применения искусственных нейронных сетей для анализа термографических изображений. Методология основана на тепловизионном контроле, который позволяет дистанционно и бесконтактно фиксировать распределение температуры на поверхности оборудования. На основе ограниченного набора исходных термографических снимков была создана и обучена сверточная нейронная сеть для бинарной классификации состояния оборудования (наличие и отсутствие течи). Обученная модель продемонстрировала 100% точность на тестовых данных. Разработанный подход позволяет автоматизировать процесс диагностики, исключить влияние человеческого фактора и может быть интегрирован в системы предиктивного обслуживания и мониторинга в реальном времени.

Ключевые слова: автоматизированные системы, атомная станция, диагностика оборудования, искусственные нейронные сети, надежная эксплуатация, неразрушающий контроль, тепловизионный контроль, термографический снимок, течь, трубопроводная арматура.

Для цитирования: Ченцова А.Ю., Шапошникова Н.Ю., Микшин И.А., Воробьев Е.В. Автоматизация диагностики оборудования АС с помощью искусственных нейронных сетей. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(3):36–42. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-04>

For citation: Chentsova A.Yu., Shaposhnikova N.Yu., Mikshin I.A., Vorobiev E.V. Automation of NPP equipment diagnostics using artificial neural networks. *Nuclear Safety*. 2025;15(3):36–42. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-04>

Automation of NPP equipment diagnostics using artificial neural networks

Alyona Yu. Chentsova , Nadezhda Yu. Shaposhnikova, Igor A. Mikshin ,
Egor V. Vorobiev 

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

 elkit2004@yandex.ru

Abstract. The article discusses the actual problem of automating the diagnostics of nuclear power plant equipment to improve its reliability and safety. A method for detecting leaks in pipe fittings based on the use of artificial neural networks for the analysis of thermographic images is proposed. The methodology is based on thermal imaging control, which allows remote and contactless recording of temperature distribution on the surface of the equipment. Based on a limited set of initial thermographic images, a convolutional neural network is created and trained for binary classification of equipment condition (presence and absence of leaks). The trained model demonstrated 100% accuracy on the test data. The developed approach makes it possible to automate the diagnostic process, eliminate the influence of the human factor and can be integrated into predictive maintenance and real-time monitoring systems.

Keywords: automated systems, nuclear power plant, equipment diagnostics, artificial neural networks, reliable operation, non-destructive testing, thermal imaging, thermographic image, leak, pipeline fittings.

Введение

Поддержание работоспособности оборудования атомных электростанций (АЭС) является критически важной задачей, обусловленной требованиями радиационной и экологической безопасности. Допущение неисправности в различных компонентах систем может привести к серьезным последствиям, угрожающим жизни и здоровью людей, инфраструктуре и окружающей среде. [1]. Регулярный контроль и диагностика состояния оборудования атомных станций играют ключевую роль в предотвращении аварий и чрезвычайных ситуаций, так как благодаря этим процессам устанавливаются и изучаются признаки, которые характеризуют наличие дефектов в работе системы. Это помогает своевременно локализовать и устранять неисправности оборудования АЭС [2].

В рамках данного исследования рассматривается трубопроводная арматура (ТА) оборудования атомной станции – это техническое устройство, которое предназначено для управления потоком рабочей среды в системах трубопроводов путем изменения площади проходного сечения. К основным типам арматуры относятся задвижки, клапаны, краны и затворы¹. Данное устройство представлено на рисунке 1.



Рисунок 1. Трубопроводная арматура
Figure 1. Pipeline fittings

ТА используется для перекрытия и открытия потока рабочей среды, регулирования его скорости, направления и давления, а также для разделения и смешивания нескольких потоков. ТА играет критически важную роль в обеспечении надежности, безопасности и эффективности работы трубопроводных систем на объектах различного назначения: от бытовых коммуникаций до промышленных предприятий и специализированных установок, в т.ч. АЭС.

Одной из основных неисправностей ТА является течь – канал или пористый участок изделия, нарушающий его герметичность². Данный дефект может привести к ускоренному износу оборудования, изменению давления, а также проникновению рабочего вещества во внешнюю среду, что может повлечь угрозу загрязнения (в т.ч. радиационного), риска для здоровья и безопасности людей и окружающей среды, а также чрезвычайной ситуации.

Вследствие этого, автоматизация диагностики оборудования является критически важной задачей для обеспечения своевременного реагирования на зарождающиеся неисправности. Целью настоящей статьи явилась разработка метода диагностики ТА, который основан на применении искусственных нейронных сетей (ИНС) в тепловизионном контроле (ТБК) оборудования.

Методология

Тепловизионный контроль трубопроводной арматуры

Для обеспечения надежности и безопасности эксплуатации оборудования используются различные методы диагностики, одним из которых является метод бесконтактной инфракрасной термографии или тепловизионный контроль. Это метод неразрушающего контроля, который осно-

¹ ГОСТ 24856-2014. Арматура трубопроводная. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2020. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200115380> (дата обращения: 01.04.2025).

² ГОСТ 26790-85. Техника течеискания. Термины и определения – Москва: Издательство стандартов, 2004. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200009520> (дата обращения: 02.04.2025).

ван на регистрации теплового излучения объекта специальными приборами (тепловизорами) и преобразовании полученных данных в цифровую тепловую карту, визуализирующую пространственное распределение температуры на поверхности объекта. При этом холодные и горячие участки обычно обозначаются цветами синего и красного спектра соответственно³. Авторы отмечают следующие преимущества ТВК перед другими методами диагностики [3]:

- дистанционный характер измерений;
- независимость от типа материала контролируемого оборудования;
- мониторинг больших площадей;
- высокая скорость измерения и анализа результатов.

Это подтверждает, что метод ТВК является наиболее подходящим способом для нахождения зарождающихся дефектов на АЭС. [4,5]

Диагностирование ТА при помощи ТВК выполняется по схеме, приведенной на рисунке 2.

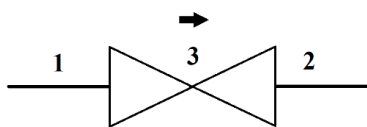


Рисунок 2. Схема точек контроля при определении течи трубопроводной арматуры (стрелкой обозначено направление движения рабочей среды)
Figure 2. Diagram of control points for determining the leakage of pipeline fittings (the arrow indicates the direction of movement of the working medium)

На схеме используются следующие обозначения:

- участок 1 – участок оборудования, в который поступает рабочая среда;
- участок 2 – участок оборудования, который следует после трубопроводной арматуры и в который не должна попадать рабочая среда при перекрытии ее потока;
- участок 3 – трубопроводная арматура, которая перекрывает поток рабочей среды.

³ РД 153-34.0-20.364-00. Методика инфракрасной диагностики тепломеханического оборудования. – Москва: РАО «ЕЭС РОССИИ», АО «Фирма ОРГРЭС», 2000. – 50 с. – Режим доступа: <https://www.аттестациялабораторий.рф/documents/docs/rd-153-34.0-20.364-00.pdf>

При этом возможны 2 случая:

1. Отсутствие течи: участок 1 обозначается красным цветом из-за нагрева рабочей средой, участок 2 обозначается синим цветом. Следовательно, ТА (участок 3) находится в исправном состоянии, так как успешно перекрывает поток рабочей среды из участка 1 в участок 2.

2. Наличие течи: участок 1 и участок 2 обозначаются красным цветом из-за нагрева рабочей средой. Следовательно, в ТА (участок 3) имеется течь, через которую рабочая среда проникает из участка 1 в участок 2.

Примеры термографических снимков, демонстрирующие данные случаи, представлены на рисунке 3.

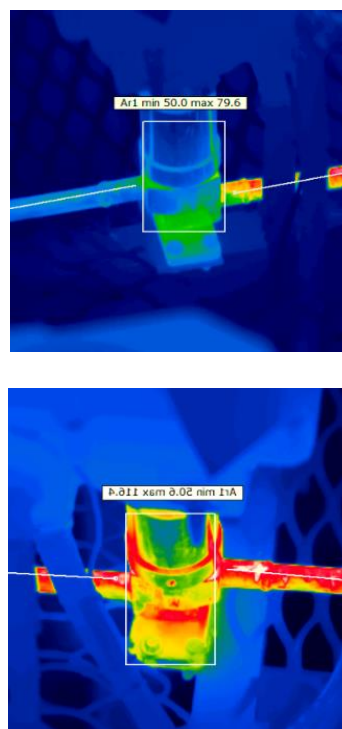


Рисунок 3. Примеры термографического изображения с наличием течи (сверху – отсутствие течи, снизу – наличие течи)

Figure 3. Examples of thermographic images with leaks (above – absence of leaks, below – presence of leaks)

Это может лечь в основу бинарной классификации для обучения ИНС, которая позволит автоматизировать процесс диагностики оборудования на наличие течи.

Искусственная нейронная сеть

В последние годы все большую популярность приобретает одно из самых сложных и в то же время перспективных направлений в

информационных технологиях – искусственные нейронные сети. Благодаря способности к самостоятельному обучению ИНС способны решать широкий спектр самых сложных задач: задачи классификации (идентификация различных объектов, например, лиц и номерных знаков автомобилей), задачи регрессии (прогнозирование значения переменных на основании других переменных), анализ данных (обнаружение закономерностей и извлечение полезной информации), и т.д. Благодаря этому становится возможным применение ИНС в огромном количестве областей: финансы, медицина, безопасность и др. [6].

Вопросы использования нейронных сетей в диагностике оборудования нашли широкое освещение в современной научной литературе.

В статье [7] рассматривается диагностика электропривода постоянного тока с помощью вероятностной нейронной сети. ИНС позволяет классифицировать состояние электропривода на основе параметров электропривода (ток, напряжение, скорость) на 4 состояния:

- нормальный режим относительно момента нагрузки;
- нормальный режим относительно сопротивления якорной обмотки;
- повышение момента нагрузки;
- снижение сопротивления якорной обмотки.

Этот подход позволяет классифицировать дефекты (межвитковые замыкания, повреждения магнитопровода) без остановки оборудования, демонстрируя эффективность глубинного обучения для обработки нестационарных сигналов.

В исследовании [8] рассматривается применение сверточных нейронных сетей (СНС) для диагностики трансформаторов. Данный вид ИНС активно применяется для анализа изображений, в т.ч. термографических данных в реальном времени. В данной работе входные данные формируются путем преобразования отношений токов, напряжений и мощностей в графические изображения, которые обрабатываются тремя параллельными ИНС. Этот подход позволяет класси-

фицировать дефекты (межвитковые замыкания, повреждения магнитопровода) без остановки оборудования, демонстрируя эффективность глубинного обучения для обработки нестационарных сигналов.

В работе [9] для диагностики подшипников качения была использована полносвязная нейронная сеть, работающая с предварительно обработанными спектральными признаками. В ходе исследования была создана ИНС, которая способна определять следующие состояния подшипника:

- нормальное состояние;
- дефект внутреннего кольца;
- дефект внешнего кольца;
- дефект шарика.

В связи с ограниченным набором данных (по 20 секунд для каждого типа сигнала) был применен метод аугментации, который позволил значительно расширить набор данных для обучения ИНС. Однако авторы статьи отмечают, что для эффективного обучения нейронной сети нужен разнообразный и широкий набор данных. Несмотря на это метод достигает 100% точности на данных IMS, превосходя более сложные модели благодаря эффективному выделению признаков и оптимизированной структуре сети.

Таким образом, на основе признаков, благодаря которым определяется наличие дефектов, становится возможным создание и применение нейронных сетей для диагностики промышленного оборудования. Данный подход демонстрирует высокую эффективность и универсальность, а также позволяет точно и быстро идентифицировать дефекты в реальном времени без остановки оборудования.

Реализация ИНС

В качестве исходных данных для обучения ИНС были использованы 6 термографических снимков, предоставленных работниками Научно-исследовательского института атомного энергетического машиностроения (НИИ АЭМ). В соответствии с рассмотренной ранее бинарной классификацией состояния ТА набор делится на 3 снимка с исправным ТА и 3 снимком с неисправным ТА.

Для расширения данных была использована аугментация данных. Это технология позволяет снизить вероятность переобучения нейронной сети и увеличить разнообразие контекстов, в которых модель распознает течь в ТА. Благодаря повороту, вертикальному и горизонтальному отражению, изменению яркости, контрастности и цветовой насыщенности было получено 120 изображений: 60 изображений для исправного состояния ТА и 60 изображений для ТА с наличием течи.

На основе этих данных была создана сверточная нейронная сеть, которая широко применяется для распознавания объектов на

изображениях и видеоматериалах. При этом архитектура СНС представляет собой последовательность сверточных слоев (convolution) и подвыборочных слоев (subsampling), которые чередуются между собой. Сверточные слои позволяют выявить локальные признаки (границы, текстуры и др.), формируя при этом карту признаков, а подвыборочные слои уменьшают размерность этой карты, сохраняя при этом ключевую информацию. Выходной слой всегда является полносвязным (full connection) и после анализа изображения выдает пользователю класс, которому оно соответствует. [10]

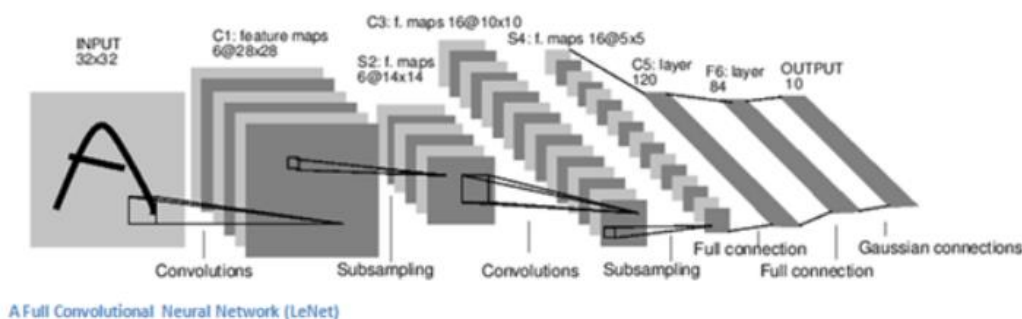


Рисунок 4. Типовая архитектура сверточной нейронной сети для задач классификации объектов на изображении

Figure 4. Typical architecture of a convolutional neural network for classifying objects in an image

При работе с обученной ИНС пользователь загружает в приложение термографический снимок ТА, который в дальнейшем нормализуется, т.е. преобразуется в стандартный для ИНС формат (244x244 пикселя). В дальнейшем происходит анализ изображения – ИНС на основе сформированной карты признаков определяет наличие или отсутствие течи в ТА. Результаты анализа передаются пользователю в удобном для восприятия формате: в виде сообщения о наличии или отсутствии течи в оборудовании.

Для оценки модели была проведена проверка определения наличия течи на изначальных тепловизионных снимках ТА. При этом ИНС определила правильно все 6 изображений, что равно 100% эффективности модели.



Рисунок 5. Процесс взаимодействия пользователя с ИНС

Figure 5. Process of user interaction with an ANN

Результаты

В ходе данного исследования была подтверждена возможность использования ис-

кусственных нейронных сетей для автоматизации диагностики оборудования АЭС на примере разработки и использования 2 ИНС: для определения наличия течи в ТА по термографическому снимку оборудования и для подробного исследования термографических показателей выделенного пикселя.

Данный подход позволяет исключить человеческий фактор (усталость, невнимательность и т.д.), а также освободить время работы персонала для более трудозатратных задач.

При дальнейшей разработке для диагностики оборудования может быть использован не только анализ его термографических снимков, но и других показателей, таких как акустическая эмиссия. Это позволит более подробно анализировать состояние оборудования и повысить чувствительность методов диагностики к зарождающимся неисправностям. Конечным результатом разработки является системы мониторинга в реальном времени и системы предиктивного обслуживания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Титов С.А., Барбин Н.М., Кобелев А.М. Анализ аварийных ситуаций, связанных с пожарами на атомных электростанциях. *Пожаровзрывобезопасность*. 2021;30(5):66–75. <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.66-75>
- Titov S.A., Barbin N.M., Kobelev A.M. The analysis of emergency situations related to fires at nuclear power plants. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and explosion safet.* 2021;30(5):66–75 (in Russ.). <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.66-75>
2. Саубанов О.М., Валеев А.Р., Акимов В.И., Харисов Р.М., Ташбулатов Р.Р. Разработка комплексного подхода к определению технического состояния насоснокомпрессорного оборудования. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2019;2:30–35. <https://doi.org/10.24411/0131-4270-2019-10206>
- Saubanov O.M., Valeev A.R., Akimov V.I., Kharisov R.M., Tashbulatov R.R. Developing a complex approach of determination of a technical condition of pumps and compressors. *Transport and storage of oil products and hydrocarbons*. 2019;2:30–35. (in Russ.). <https://doi.org/10.24411/0131-4270-2019-10206>
3. Швец Д.В., Абидова Е.А., Калашников М.В., Поваров П.В., Воробьев Е.В. Концепция создания комплексной автоматизированной системы тепловизионного контроля. *Глобальная ядерная безопасность*. 2022;(1):60–66. <https://doi.org/10.26583/gns-2022-01-06>
- Shvets D.V., Abidova E.A., Kalashnikov M.V., Povarov P.V., Vorobev E.V. Concept of creating an integrated automated thermal imaging control system. *Nuclear safety*. 2022;(1):60–66 (in Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2022-01-06>
4. Ещенко Д.В., Никитин А.Т., Белов О.А. Практическое применение методов тепловизионного анализа и контроля // Вестник КамчатГТУ. 2020;(54):6–19. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2020-54-6-19>
- Eshchenko D.V., Nikitin A.T., Belov O.A. Practical application of thermal-imaging analysis and control methods. *Bulletin of Kamchatka State Technical University*. 2020;(54):6–19. (in Russ.). <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2020-54-6-19>
5. Yuanbin W., Yang Y., Jieying R. Research on thermal state diagnosis of substation equipment based on infrared image. *Advances in Mechanical engineering*. 2019;4(11):1–14. <https://doi.org/10.1177/1687814019828551>
6. Kadurumba C.H., Nwaiwu U., Nwasuka N.C. Neural network applications. *International journal of mechanical and production engineering research and development*. 2020;10(3):11897–11910. Available at: https://www.researchgate.net/publication/344174270_NEURAL_NETWORK_APPLICATIONS (accessed: 02.04.2025).
7. Старчевский М.В., Бида П.И. Использование нейронных сетей в диагностике автоматизированного электропривода. *Форум молодых ученых*. 2017;4(8):115–120. Режим доступа: https://www.forum-nauka.ru/files/ugd/b06fdc_779bcc49ad634b319187cfb6fa067762.pdf (дата обращения: 26.04.2025).
- Starchevsky M.V., Bida P.I. Using neural networks in the diagnostics of automated electric drive. *Forum of young scientists*. 2017;4(8):115–120 (in Russ.). Available at: https://www.forum-nauka.ru/files/ugd/b06fdc_779bcc49ad634b319187cfb6fa067762.pdf (accessed: 26.04.2025).
8. Пехота А.Н., Галушко В.Н., Громыко И.Л. Технология использования сверточных нейронных сетей при диагностике состояния трансформаторов. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки*. 2021;12:63–69. Режим доступа: <https://journals.psu.by/fundamental/article/view/1132> (дата обращения: 26.04.2025).
- Pehota A.N., Galushko V.N., Gromyko I.L. Technology for the use of convolutional neural networks in diagnosing transformer status. *Vestnik of Polotsk State University. Part C. Fundamental sciences*. 2021;(12):63–69. (in Russ.). Available at: <https://journals.psu.by/fundamental/article/view/1132> (accessed: 26.04.2025).

9. Ибряева О.Л., Мохаммад М.Н. Диагностика неисправностей подшипников качения с использованием пиков спектра и нейронных сетей. *Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика*. 2022;11(2):59–71. <http://dx.doi.org/10.14529/cmse220205>

Ibryaeva O.L., Mohammad N.M. Fault diagnosis of rolling bearings using spectral peaks and neural networks. of South Ural State University. *Bulletin of the South Ural State University/ Series «Computational Mathematics and Software Engineering»*. 2022;11(2):59–71. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.14529/cmse220205>

10. Бредихин А.И. Алгоритмы обучения сверточных нейронных сетей. *Вестник ЮГУ*. 2019;15(1):41–53. Режим доступа: <https://vestnikugrasu.org/byusu/issue/view/917> (дата обращения: 27.04.2025).

Bredikhin A.I. Algorithms for training convolutional neural networks. *Yugra State University Bulletin*. 2019;15(1):41–53. (in Russ.). Available at: <https://vestnikugrasu.org/byusu/issue/view/917> (accessed: 27.04.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Ченцова А.Ю. – написание текста статьи, разработка программного обеспечения и нейронной сети;

Шапошникова Н.Ю. – постановка задачи, редактирование текста;

Микшин И.А. – постановка задачи, предоставление данных для создания нейронной сети, редактирование текста;

Воробьев Е.В. – участие в разработке нейронной сети.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Алена Юрьевна Ченцова, студент, «Информационные системы и технологии», Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0003-4944-2141>

e-mail: elkit2004@yandex.ru

Надежда Юрьевна Шапошникова, старший преподаватель, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация. e-mail: NYShaposhnikova@mephi.ru

Игорь Анатольевич Микшин, ведущий инженер, НИИ АЭМ, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-5854-2353>

e-mail: mikshin89@mail.ru

Егор Вячеславович Воробьев, инженер, НИИ АЭМ, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0001-4503-4971>

e-mail: xpanr@ya.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Chentsova A.Yu. – writing the text of the article, developing software and a neural network;

Shaposhnikova N.Yu. – task setting, text editing;

Mikshin I.A. – setting the task, providing data to create a neural network, editing text;

Vorobiev E.V. – participation in the neural network development.

FUNDING:

The study had no external funding

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Alyona Yu. Chentsova, Student, «Information systems and technologies», Volgodosk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodosk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0003-4944-2141>

e-mail: elkit2004@yandex.ru

Nadezhda Yu. Shaposhnikova, Senior lecturer, Volgodosk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodosk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: NYShaposhnikova@mephi.ru

Igor A. Mikshin, Senior Engineer, SRI NPE, Volgodosk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodosk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-5854-2353>

e-mail: mikshin89@mail.ru

Egor V. Vorobiev, Engineer, SRI NPE, Volgodosk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodosk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0001-4503-4971>

e-mail: xpanr@ya.ru

Поступила в редакцию / Received 21.05.2025

После доработки / Revision 28.08.2025

Принята к публикации / Accepted 02.09.2025

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-05>

EDN MKMHKV

Оригинальная статья / Original paper



Опыт проведения реагентной очистки оросителя для повышения охлаждающей способности и эффективности работы башенной испарительной градирни

В.П. Поваров  , **В.В. Бакулин, Н.В. Карандеева**

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»

г. Нововоронеж, Воронежская область, Российская Федерация

 PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Аннотация: Описан уникальный опыт по очистке оросителя башенной испарительной градирни на энергоблоке №1 НВАЭС-2 для повышения ее охлаждающей способности. Проведена оценка эффективности реагентной очистки оросителя от карбонатных отложений в ремонтную кампанию 2025 г. в сравнении с механическими способами, опробованными ранее. Описан процесс взаимодействия реагента с загрязнениями. Рассмотрено влияние рабочего раствора на конструкционные элементы градирни. Особое внимание уделено технологии проведения очистки с акцентом на безопасность, технику и качество выполнения работ с достижением критериев успешности процесса. Представлены результаты лабораторных испытаний по определению химического состава отложений и конечных продуктов очистки. Предложены способы утилизации промывных вод с минимизацией экологической нагрузки. В статье проанализировано влияние факторов проведения процесса на его эффективность: состава, концентрации реагента, времени экспозиции промывочного раствора и степени загрязнения участков оросителя. На основании полученных данных по изменению охлаждающей способности градирни после ППР-2025 рассчитан экономический эффект и срок окупаемости представленного метода.

Ключевые слова: башенные испарительные градирни, ороситель, внутрикорпусные устройства, солеотложения, водно-химический режим, ингибиторы, реагентная очистка, планово-предупредительный ремонт.

Для цитирования: Поваров В.П., Бакулин В.В., Карандеева Н.В. Опыт проведения реагентной очистки оросителя для повышения охлаждающей способности и эффективности работы башенной испарительной градирни. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(3):43–56. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-05>

For citation: Povarov V.P., Bakulin V.V., Karandeeva N.V. Sprinkler reagent cleaning experience to improve cooling capacity and evaporative cooling tower efficiency. *Nuclear Safety*. 2025;15(3):43–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-05>

Sprinkler reagent cleaning experience to improve cooling capacity and evaporative cooling tower efficiency

Vladimir P. Povarov  , **Vladimir V. Bakulin, Natalya V. Karandeeva**

Novovoronezh Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC

Novovoronezh, Novovoronezh, Russian Federation

 PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Abstract. This paper describes a unique experience in cleaning the sprinkler of the evaporative cooling tower at power unit No. 1 of the Novovoronezh NPP-2 to increase its cooling capacity. The effectiveness of reagent cleaning of the sprinkler from carbonate deposits during the 2025 repair campaign was evaluated in comparison with mechanical methods tested earlier. The process of reagent interaction with contaminants is described. The influence of the working solution on the structural elements of the cooling tower is considered. Particular attention is paid to the cleaning

technology with an emphasis on safety, technique, and quality of work with the achievement of process success criteria. The results of laboratory tests to determine the chemical composition of deposits and final cleaning products are presented. Methods for the disposal of wash water with minimal environmental impact are proposed. The article analyses the influence of process factors on its effectiveness: composition, reagent concentration, exposure time of the washing solution, and the degree of contamination of the sprinkler areas. The economic effect and payback period of the presented method are calculated based on the data obtained on the change in the cooling capacity of the cooling tower after SPM-2025.

Ключевые слова: Evaporative cooling towers, sprinkler, internal devices, salt deposits, water chemistry, inhibitors, reagent cleaning, scheduled preventive maintenance.

Введение

Башенные испарительные градирни (БИГ) являются ключевыми элементами системы основной охлаждающей воды и обеспечивают отвод тепла к конечному потребителю – атмосфере. Своего рода – это третий контур охлаждения, эффективность работы которого влияет на выработку электроэнергии и напрямую зависит от чистоты теплообменной поверхности оборудования, в том числе внутрикорпусных устройств градирни. Для обеспечения эффективной работы БИГ и другого оборудования системы основной охлаждающей воды важно поддерживать оптимальный водно-химический режим, гарантирующий минимизацию образования отложений и коррозионных повреждений оборудования в системе [1]. Однако в условиях упаривания избежать полного отсутствия отложений в системе, работающей на воде гидрокарбонатного класса с пограничным индексом Ризнера¹ и склонной к образованию накипи, невозможно [2]. Наиболее подвержены заносу солеотложениями тупиковые зоны, участки с недостаточно эффективным водораспределением, а также развитая поверхность оросительного устройства, которая является границей раздела фаз жидкость-пар. Чем более развита поверхность, тем более интенсивно происходит процесс испарения. Начальное образование отложений повышает развитость поверхности за счет кристаллов накипи, имеющих игольчатую структуру и, соответственно, не приво-

дят к снижению эффективности оросителя. Постепенно увеличиваясь в размерах, кристаллические отложения сливаются в единый конгломерат, что приводит к частичному или полному нарушению проходного сечения сетки оросителя, заметно снижая пропускную способность оросителя, что в конечном итоге ухудшает глубину охлаждения воды. Со временем отложения создают механическое напряжение на материалах оросителя, что может привести к деформации или растрескиванию, особенно если он изготовлен из полимеров. Кроме того, во влажном состоянии отложения значительно утяжеляют рабочие слои оросителя, создавая дополнительную нагрузку на опорные балки, что представляет опасность обрушения конструктивных элементов градирни [3].

В связи с внедрением стабилизационного водно-химического режима (ВХР), предусматривающего введение ингибиторов солеотложений в оборотную воду градирни, при условии ограничения упаривания (с поддержанием соответствующих объемов подпитки и продувки для эффективного водообмена), введен нормативный показатель «Транспорт кальция, не менее 90%»¹. Это означает, что допустимый уровень остаточной концентрации кальция в оборотной воде, вызывающего образование карбонатных отложений, должен быть не более 10% [4]. Но даже это количество кальция (в среднем 140 мг/дм³) при циркуляции упаренной донской воды способно вызвать образование отложений карбоната кальция порядка

¹ СТО 1.1.1.02.006.1550-2018. Коррекционная обработка охлаждающей воды башенных испарительных градирен атомных станций. – Москва: АО «Концерн Росэнергоатом», 2019. – Режим доступа: в локальной сети организации.

600 т/год². Как следствие, в системе значительно ухудшается теплосъем, падает охлаждающая способность градирни, что приводит к недовыработке электроэнергии.

Для восстановления теплопередающих свойств металлической поверхности оборудования широко применяется химическая промывка трубок и пластин в теплообменниках с использованием щадящих кислот, таких, как лимонная, сульфаминовая, фосфорная [5]. Учитывая хорошую растворимость карбонатных отложений в кислой среде, возникла идея проведения реагентной очистки от карбонатных отложений полимерного оросителя, устойчивого к агрессивным свойствам кислот [6]. Во избежание разрушения бетона, необходимо также предусмотреть защиту бетонных конструкций градирни от негативного воздействия промывочного раствора. Для соблюдения этого важного условия на базе Томского государственного архитектурно-строительного университета совместно со специалистами ООО «Новохим» были разработаны отечественный реагент «Антиржавин» и технология очистки оросителя, предусматривающая экранирование внутрикорпусных бетонных конструкций тентовым легко монтируемым изделием из поливинилхлорида, стойкого к кислотам.

В период планово-предупредительного ремонта (ППР) 2023 г. на энергоблоке №1 НВАЭС-2 специалистами ООО «Новохим» проведены пробные испытания технологии реагентной очистки оросителя на одном из выделенных секторов центральной зоны площадью 50 м² для последующей реализации мероприятий по восстановлению охлаждающей способности градирни в ППР-2025. Следует отметить, что работы проводились осенью при температуре наружного воздуха от +5°C до +7°C. Результаты выполненных работ следующие: ороситель, достигший критерия очистки

(80 кг/м³), в среднем отмыт на 93,5%; ороситель, достигший критерия замены (200 кг/м³), отмыт на 75 %, что вывело его в состояние, не требующее замены. В условиях оптимизации сроков проведения планового ремонта блоков снижение трудозатрат и времени выполнения работ по ремонту БИГ с применением технологии реагентной очистки оросителя ООО «Новохим» представляются весьма перспективными и позволят выполнять очистку оросителя в установленные сроки. Периодическая очистка оросителя приведет к увеличению интервалов его замены.

В статье рассмотрены новаторский опыт, эффективность и возможность тиражирования технологии очистки оросителя любого типа от карбонатно-кальциевых отложений на примере БИГ-1 Нововоронежской АЭС-2.

Материалы, методы исследования и обсуждение результатов

В градирнях обратная вода снижает температуру за счет испарения подогретой в теплообменном оборудовании воды и конвективного теплообмена при контакте с воздухом, затем уже охлажденная, она вновь подается в теплообменники и конденсаторы. Градирни должны обеспечивать эффективность охлаждения и связанную с ней тепловую экономичность электростанции. На АЭС применяют башенные градирни, в которых система раздачи охлаждаемой воды расположена внутри башни. Схема работы башенной испарительной градирни изображена на рисунке 1.

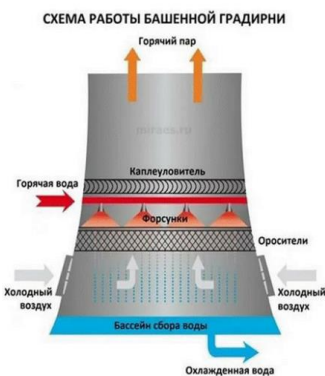


Рисунок 1. Схема работы башенной испарительной градирни

Figure 1. Operating scheme of the tower evaporative cooling tower

² Отчет «Анализ используемых и новых технологий повышения эффективности эксплуатации ТМО технических схем АЭС. Разработка предложений и рекомендаций для повышения эффективности эксплуатации ТМО». Москва 2017, с. 212. – Режим доступа: в локальной сети организации.

Для организованного водоснабжения горячая вода поступает в градирню через два подводящих канала. Далее вода подается через четыре вертикальные подъемные шахты к распределительному уровню. Горизонтальные распределительные трубопроводы соединены с верхней частью вертикальных водоподъемных каналов. Затем вода под давлением 15–20 кПа поступает в оросительное устройство, расположенное на высоте 10–20 м, через боковые распределительные

трубы, соединенные с водораспределительными каналами. Рабочие трубопроводы, выполненные из стеклопластика, примыкают к боковым поверхностям водораспределительных каналов. Каплеуловительное устройство (в виде гофрированных листов из ПВХ) предназначено для снижения капельного уноса из градирен. На рисунке 2 изображена технологическая часть градирни энергоблока НВАЭС-2.

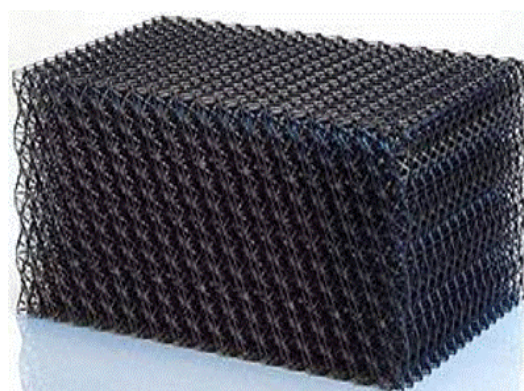
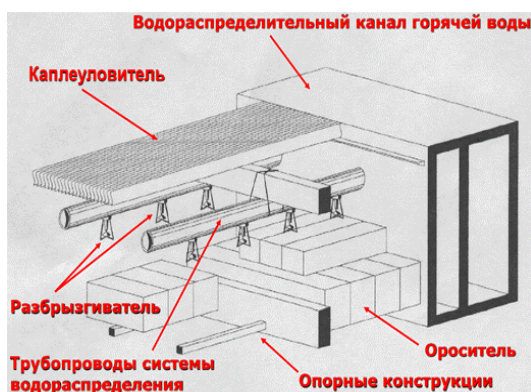


Рисунок 2. Технологическая часть градирни энергоблока НВАЭС-2 с оросителем
Figure 2. The technological part of the cooling tower of the NVNPP-2 power unit with a sprinkler

Вода, поступающая с оросителя, накапливается в бассейне градирни и попадает в главный бассейн насоса охлаждающей воды через отводящий канал градирни.

Оросительное устройство является основным рабочим элементом градирни, в котором вода разделяется на капли, струи или пленки и стекает вниз навстречу воздуху, поступающему через боковые отверстия внизу вытяжной башни. В результате взаимодействия с воздухом вода охлаждается за счет конвективного теплообмена и испарения. Нагретый и насыщенный водяными парами воздух отводится вверх через вытяжную башню.

При разбрызгивании воды в градирнях, вследствие распада гидрокарбонатов и потери свободной углекислоты, происходит увеличение концентрации карбонатов, при взаимодействии которых с кальцием образуются нерастворимые кристаллы накипи карбоната кальция. Процесс образования отложений описывается уравнениями химических реакций: $2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{CO}_2\uparrow + \text{H}_2\text{O}$ и $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CaCO}_3\downarrow$.

Стоит отметить, что на энергоблоках № 1,2 НВАЭС-2 в системе основной охлаждающей воды проектом предусмотрен стабилизационный ВХР. Данный ВХР достаточно рискован с точки зрения вероятности образования отложений в силу высокой карбонатной жесткости охлаждающей воды. В центральной, наиболее теплонапряженной зоне БИГ, работа системы водораспределения обеспечивает высокие скорости потока циркуляционной воды, тем самым способствует смыву рыхлых солеотложений с поверхности внутрикорпусных устройств (ВКУ). В силу конструкционных особенностей оросителя, имеющего решетчатую структуру и развитую поверхность, он наиболее подвержен заносу отложениями. Кроме того, из-за интенсификации процесса испарения на границе раздела фаз, занос оросительных элементов градирни карбонатом кальция неизбежен.

По результатам ежегодного мониторинга установлено, что слои оросителя загрязнены неравномерно, а именно, первый (нижний) слой, контактирующий с атмосферой, наиболее загрязнен. Кроме того, он испыты-

вает фильтрационную нагрузку, задерживая на своей поверхности взвешенные вещества (ил), биологические загрязнения и соли. Встала задача восстановления проходимости сечений сетки оросителя эффективным, быстрым (укладывающимся в установленные сроки ППР), безопасным способом с учетом наличия бетонных конструкций и послойной неравномерности загрязнений. Из-за опасения воздействия на бетон агрессивных реагентов, способных растворить отложения, специалистами Нововоронежской АЭС были выполнены и оценены безреагентные (механические) методы очистки оросителя. Суть методов и достигнутые результаты описаны ниже.

1. Метод вибрационного воздействия с последующим удалением отложений гидроструйной очисткой аэродинамическим способом аппаратом высокого давления. Метод с частичным демонтажом. Первый слой не демонтируется, второй и третий слои снимаются для вибрационного воздействия в горизонтальной плоскости с частотой 3000 колебаний в минуту, вынуждающей силой от 5,6 кН до 11,3 кН, статическим моментом от 5,7 кг/см² до 11,4 кг/см². Метод очистки блоков оросителя при помощи виброплощадок и продувки сжатым воздухом оказался не достаточно эффективным. Виброплощадка с планируемой частой вибрацией, вынуждающей силой и статическим моментом ожидаемых воздействий на сильно загрязненные блоки оросителя не дала. Дальнейшее увеличение вынуждающей силы и статического момента не производилось, так как не было данных по разрешенной нагрузке на опорную конструкцию градирни. Эффективность механического метода очистки – 30%. Преимущество – безопасность для бетонных конструкций градирни. Недостатки – большие трудозатраты и частичное повреждение оросителя при демонтаже – монтаже. При наличии резервного запаса оросителя можно произвести частичную замену, сократить время работ по восстановлению проектных характеристик градирни, а очистку демонтированных участков проводить при работе энергоблока.

2. Криогенный бластинг. Использованное оборудование – бластер Triventekі, парамет-

ры сжатого воздуха 0,7 МПа. Эффект очистки блока оросителя с использованием технологии «криогенный бластинг» не превышает 13%. Преимущество – безопасность для бетонных конструкций градирни. Недостатки – малоэффективен, так как струя подаваемого сжатым воздухом «сухого льда» не проходит весь слой оросителя 1,35 м, поэтому очистка блока оросителя БИГ-1 с использованием данной технологии требует разборки оросителя БИГ.

3. Гидромеханическая очистка с помощью пневмопушки на мощности. Данный метод подходит для очистки внутренней и наружной периферийных зон градирни. На этапе, проводимом «на режиме», производится удаление большей части (до 60%) минеральных отложений с применением «пневмопушки». Установка поочередно заезжает в каждую секцию с внешней стороны градирни и постепенно простреливает струей сжатого воздуха и воды ороситель на удалении 12 метров от внешнего контура башни. Воздействие сжатого воздуха и воды, а также возникшие колебания приводят к осыпанию отложений на дно бассейна градирни, а непрерывный поток воды сверху смывает застрявшие остатки минеральных солей. Преимущество – безопасность для бетонных конструкций градирни, возможность производить очистку в период топливной кампании. Недостатки – не эффективен, так как отсутствует возможность очищать ороситель центральной зоны при работе на мощности.

4. Очистка оросителя пневмо-импульсным способом. Выполняется без демонтажа оросителя мелкодисперсными двухфазными импульсами сжатого воздуха с каплями воды (размер капель не более 5 мкм). Сжатый воздух из ресиверов пневмопушек при мгновенном (0,003 сек.) открытии быстрого клапана формирует фронт воздушной ударной волны, кинетической энергией которой производится выбивание отложений из каркасной решетки оросителя, а схлопывание кавитационных пузырьков, которые формируются в момент выстрела из поданной к стволам пушки порций воды, усиливает эффект. Очистка производится с помощью залповой системы, состоящей из четырех пневмопушек, смонтированных на раме.

Преимущество – безопасность для бетонных конструкций градирни, не требует демонтажа оросителя. Недостатки – эффективность очистки не превышает 50%.

Поскольку результаты удаления отложений механическими методами не превысили 50% от исходного веса загрязнений, перспектива выбора встала за химическим способом очистки оросителя градирни. Для предварительной оценки эффективности применяемой химии были выполнены стендовые испытания с подбором типа реагента, концентрации и температуры промывочного раствора³.

Материалами исследования являются не только отложения, поскольку их характер заранее известен, а технология проведения работ, включающая способ доставки промывочного раствора к очищаемым поверхностям, поддержание рабочей концентрации реагента, время экспозиции, критерий срабатывания раствора, процесс удаления остаточных рыхлых отложений, эффективность очистки и, главное, – защита бетонных конструкций градирни. Методы исследования включают осмотр, взвешивание отдельных участков оросителя до и после промывки, хронометраж процесса, расход реагента, определение химического состава отложений и промывочного раствора, визуальная и расчетная оценка эффективности проведения промывки.

В период ППР-2024 выполнен анализ состояния оросителя, по результатам которого было принято решение о замене периферийной зоны и отмывке центральной части градирни. Зафиксировано наличие плотно сцепленных с материалом оросителя отложений темно-серого цвета ломаной кристаллической структуры. Распределение отложений по полю оросителя неравномерное, особенно сильно загрязнены периферийные участки, контактирующие с атмосферой (нижние слои). Отложения отличаются плотностью,

твердостью и гигроскопичностью. Состав отложений следующий: CaCO_3 – 83%; SiO_2 – 11%; биологические загрязнения – 6%⁴ [6].

На основании анализа состава отложений и предварительных стендовых испытаний образцов оросителя с разной степенью загрязненности определялись тип реагента, его концентрация и температура, а также способ подачи раствора к загрязненным участкам оросителя. Технологические параметры и технические характеристики оборудования для очистки подбираются индивидуально, в зависимости от конструктивных особенностей градирен (тип опорной и опорно-подвесной системы с учетом высоты расположения оросителя и конструкции водосбросного бассейна). Скорость подачи раствора реагента и давление определяются исходя из типа выбранного оборудования.

Для очистки оросительных устройств в БИГ-1 НВАЭС-2 использовалось средство «Антиржавин», которое представляет собой водный концентрат органических и минеральных кислот, комплексонов, ингибиторов коррозии и функциональных добавок.

По заключению Томского государственного архитектурно-строительного университета определены степени воздействия реагента «Антиржавин» на бетонные образцы типа: В45, F500, W16, – по классу прочности аналогичных бетону строительных конструкций БИГ НВАЭС-2. Результаты проведенных испытаний по оценке воздействия раствора на бетон показали, что данное воздействие не оказывает влияние на габариты и прочность образцов бетона. Применение средства «Антиржавин» подтверждено АО «ВНИИАЭС» и вошло в перечень реагентов, разрешенных к применению в соответствии с методическими рекомендациями³. Факт минимального воздействия реагента «Антиржавин» на бетон исключает какое-либо разрушающее влияние на пла-

³ МР 1.1.4.04.2210-2023 Выбор технологии химической и механической очистки внутрикорпусных устройств и оросителей башенных испарительных градирен. Методические рекомендации. – Москва: АО «Концерн Росэнергоатом», 2023. – Режим доступа: в локальной сети организации.

⁴ РД ЭО 1.1.2.09.0824-2010 Лабораторный анализ отложений с теплообменного оборудования атомных электростанций с водо-водяным энергетическим реактором. Методики выполнения измерений. – Москва: АО «Концерн Росэнергоатом», 2010. – Режим доступа: в локальной сети организации.

стиковый каркас оросителя в долгосрочной перспективе применения.

Механизм взаимодействия реагента с загрязнениями основан на первоначальном разрушении структуры комплексных отложений с последующим переводом их части в растворенное состояние и удалением остаточных отложений с поверхности оросителя совместно с циркуляционным раствором. Протекание процесса сопровождается характерным бурным выделением углекислотной пены. Химизм основан на реакциях перевода карбонатов в растворимые гидрокарбонаты и углекислоту, который описывается уравнениями (процесс, обратный образованию CaCO_3): $\text{CaCO}_3 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^-$ и $\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \uparrow\text{CO}_2$, итоговое уравнение реакции растворения отложений: $\text{CaCO}_3 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{H}_2\text{O} + \uparrow\text{CO}_2$.

Работы по очистке оросителя должны предусматриваться на остановленной градирне в ППР, проведение которого выпало в 2025 г. на теплое время года, поэтому нагрев промывочного раствора не требовался.

По результатам испытания метода химической очистки оросителя на экспериментальном стенде была составлена технологическая карта процесса выполнения очистки блоков оросителя для градирни энергоблока №1 НВАЭС-2. Для обеспечения высокого качества и безопасности работ в установленные сроки осуществлялась подготовка к проведению работ, которая включала в себя разработку и выполнение комплекса организационных и технических мероприятий.

Гидрохимическая очистка оросительного устройства БИГ производилась без его демонтажа, на основании проекта производства работ, в соответствии с рабочей документацией и действующими инструкциями. Последовательность выполнения работ по очистке блоков оросителя указывалась в технологической карте процесса.

В состав работ по химической очистке блоков оросителя входило:

- 1) монтаж системы подачи и сбора химического раствора реагента;
- 2) контрольное взвешивание на платформенных весах выбранных блоков образца загрязненного оросителя градирни;

- 3) проведение гидрохимической очистки оросительного устройства градирни;

- 4) сбор отработавшего средства в накопительные емкости для отработанного раствора;

- 5) контрольное взвешивание на платформенных весах очищенных блоков оросителя градирни;

- 6) демонтаж системы подачи и сбора химического раствора реагента.

Перед началом работ по химической очистке оросителя БИГ персонал ООО «Новохим» (производителя работ) выполнил:

- 1) подготовку оборудования и реагента в достаточном количестве для очистки оросителя, емкости, инструменты, материалы в соответствии с ведомостями работ;

- 2) подготовку временных рабочих мест и определение точек подключения электрооборудования;

- 3) установку временного сигнального ограждения зоны проведения работ;

- 4) организацию сбора образовавшегося отработанного раствора;

- 5) мероприятия по защите опорных строительных конструкций и оборудования БИГ.

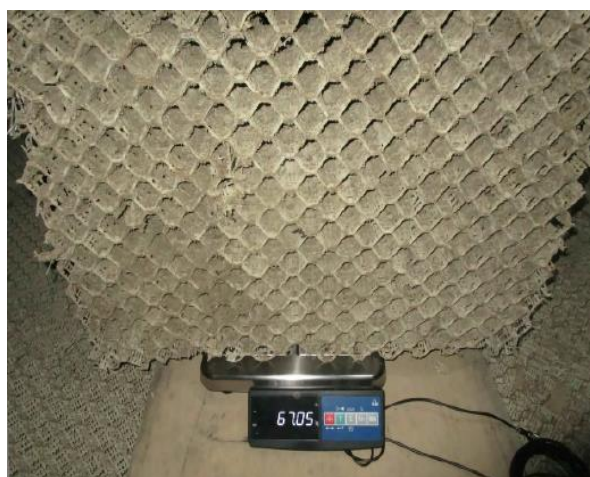
Под промываемым участком был предусмотрен специальный водосборный зонт в виде конуса для организованного сбора циркуляционного раствора, который исключал попадание раствора на внутренние конструкции градирни.

Зонт, расположенный под промываемым участком оросителя, представлен на рисунке 3.



Рисунок 3. Исполнение защитного водосборного зонта

Figure 3. The design of the protective drainage device



а)



б)

Рисунок 5. Результаты очистки оросителя градирни: а – до очистки; б – после очистки
Figure 5. Results of cleaning the cooling tower sprinkler: a – before cleaning; b – after cleaning

Ориентировочную потребность в реагенте можно было определить заранее по расчетным данным загрязненности системы в количестве 600 т. Для перевода отложений в растворимую гидрокарбонатную форму при загрязнении оросителя 100 кг/м^3 ($1000 \text{ моль/м}^3 \text{ CaCO}_3$) требуется 36,6 кг (1000 моль/м^3) HCl , в пересчете на товарный продукт – 101,3 кг соляной кислоты. В пере-

счете на 36%-ную товарную соляную кислоту это составило бы 608 т отложений. В процессе очистки БИГ-1 суммарно израсходовано 532 м^3 реагента «Антиржавин».

На рисунке 6 представлена зависимость расхода реагента в зависимости от веса очищаемого оросителя (степени загрязнения).

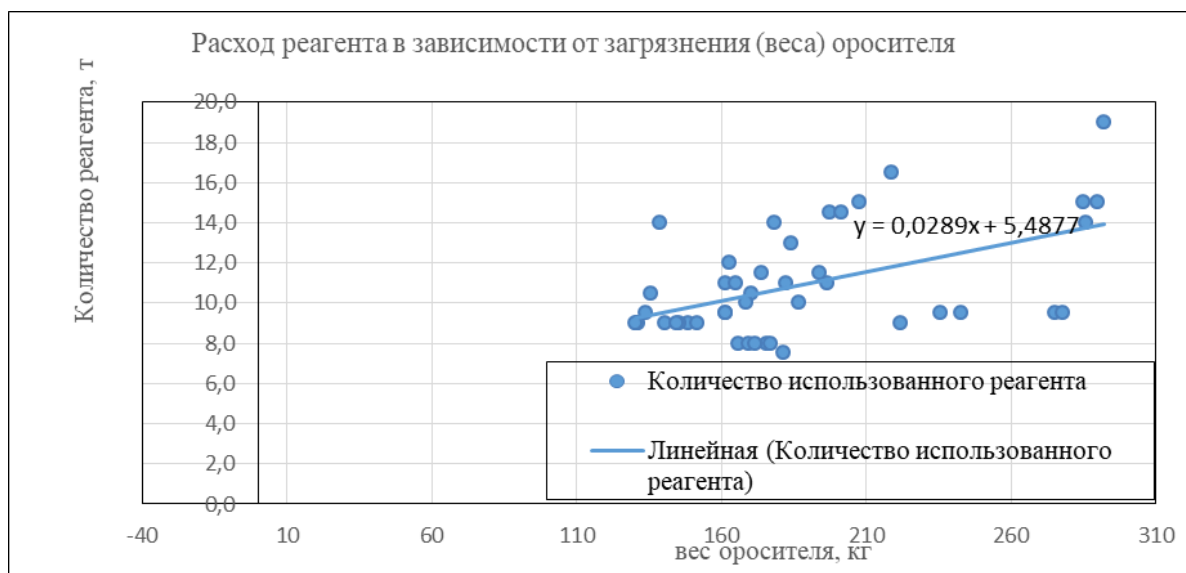


Рисунок 6. Количество использованного реагента в зависимости от степени загрязнения
Figure 6. The amount of reagent used depends on the degree of contamination

Зависимость построена исключительно на полученных фактических данных, поэтому наблюдается широкий разброс точек линейной возрастающей регрессии.

На рисунке 7 представлена диаграмма, показывающая расход реагента на различных участках зоны проведения работ по очистке.



Рисунок 7. Расход реагента для очистки центральной зоны оросителя
Figure 7. Reagent consumption for cleaning the central area of the sprinkler

По данным диаграммы видно, что более загрязненным участкам № 25, 27–29, 34–35, 37–41, 45–47 соответствует больший расход реагента. Максимальный расход реагента составил 28,5 т на участке № 47.

Отходы, образующиеся после взаимодействия моющего реагента с отложениями на оросительном устройстве, относятся к IV классу опасности (малоопасные отходы), представляющие собой нейтрализованные водные среды, содержащие соли кальция: гидрокарбонаты, фосфонаты, хлориды и сульфаты. Отработанные после промывки водные среды размещались на карте шламоотвала, оборудованного искусственным водонепроницаемым и химически стойким покрытием, что исключает контакт с окружающей средой. Таким образом, негативное влияние отходов отсутствует независимо от времени нахождения на шламоотвале (твердая фаза после испарения воды изолирована от контакта с почвой).

Результаты очистки оросителя представлены в виде диаграммы на рисунке 8 с информацией о массе слоев оросителя до и после очистки, а также эффективности проведения процесса. В среднем эффективность очистки оросителя составила 72%,

критерий очистки по весу достигнут и составляет 54 кг/м³. При этом надо учитывать и тот факт, что порядка 80% очищаемого оросителя имела критерий загрязнения его замены.

Загрязненность оросителя влияет на эффективность очистки, которая находится в диапазоне 60–80%. Зависимость эффективности очистки оросителя от его массы представлена на рисунке 9.

Зависимость эффективности очистки от веса загрязненного оросителя описывается линейной убывающей регрессией и определяется по разнице веса до и после отмывки отдельных участков оросителя по формуле (1):

$$\text{Эффективность, \%} = \left(\frac{\text{Вес после отм.}}{\text{Вес до отм.}} \right) * 100 \quad (1)$$

Разброс точек на графике зависимости достаточно широк из-за усредненных фактических данных по весу загрязненного и очищенного оросителя, включая вес ПВХ-каркаса. Следует отметить, что участки с сильной загрязненностью (до 200 кг) претерпели высокую степень очистки с эффективностью на уровне 75–80%.

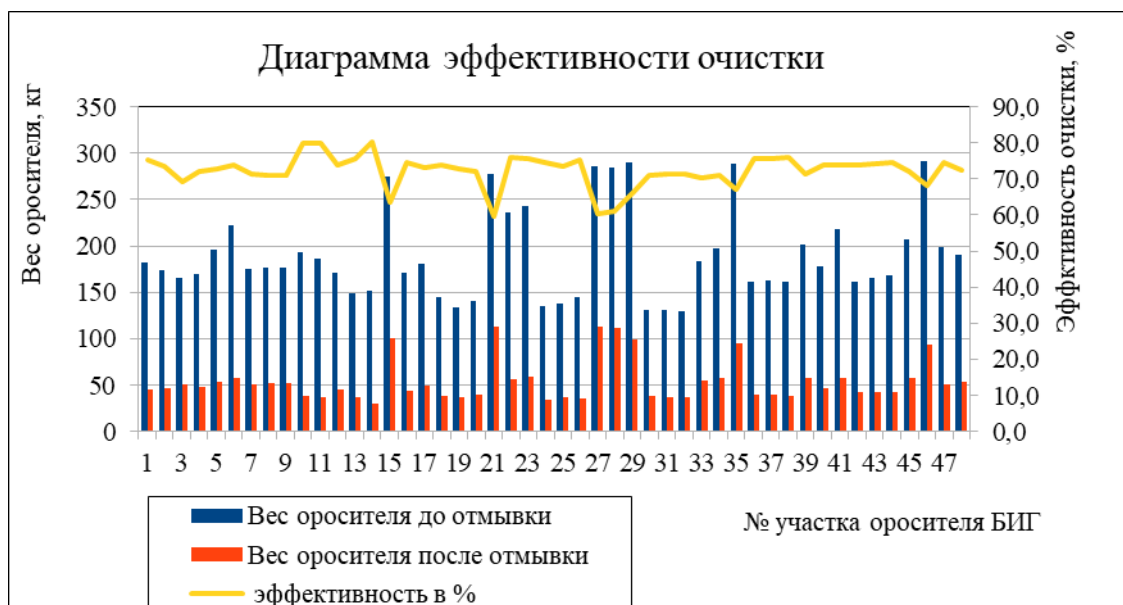


Рисунок 8. Диаграмма с оценкой эффективности очистки
Figure 8. A diagram with an assessment of cleaning efficiency

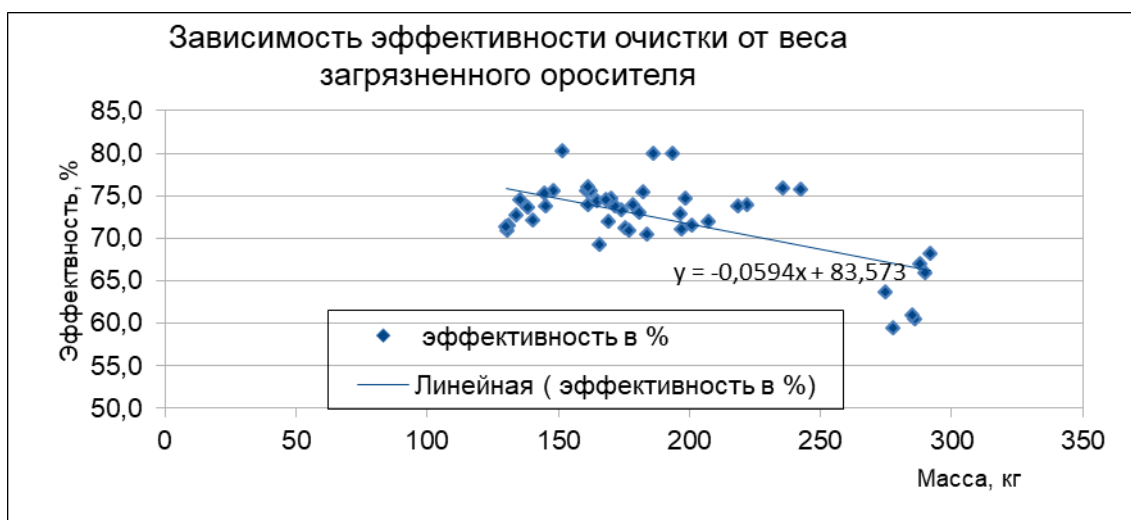


Рисунок 9. Зависимость эффективности очистки от массы загрязненного оросителя
Figure 9. Dependence of the cleaning efficiency on the mass of the polluted sprinkler

Эффективность очистки оросительного устройства подтверждена результатами применения технологии гидрохимической очистки средством «Антиржавин» на отдельном сегменте оросителя в ППР-2023 и оросителе центральной зоны градири в ППР-2025.

Для непрерывного мониторинга за динамикой изменения веса влажного оросителя произведен монтаж автоматизированной системы взвешивания в центральной и периферийной зонах орошения градири. Фиксация результатов, превышающих установ-

ленные критерии очистки и замены, необходима для планирования соответствующих мероприятий по очистке или замене оросителей в ближайший ППР.

Представленный уникальный способ реагентной очистки оросителя не требует демонтажа и последующей установки элементов оросителя, исключает механические повреждения, связанные с монтажными работами. По трудоемкости значительно ниже процесса замены оросителя, эффективен при условии соблюдения требований безопасности и защиты бетонных конструкций, может

применяться в качестве альтернативной меры другим (механическим) способам очистки и замене дорогостоящего оросителя БИГ в условиях сжатых сроков ППР.

Гидрохимический метод очистки оросителя позволяет выполнить работы по восстановлению безопасной и эффективной эксплуатации градирни в короткие сроки. Работы по замене оросителя по материальным затратам примерно сопоставимы с хи-

мической очисткой, но не могут конкурировать с представленным методом по срокам выполнения работ и трудозатратам (человеко-часы).

Таким образом, на НВАЭС опробованы пять способов очистки оросителя градирни. Полученные результаты приведены в таблице 1. Преимущества реагентного (гидрохимического) метода очевидны.

Таблица 1. Способы очистки оросителя градирни и результаты их применения на испытуемых образцах НВАЭС

Table 1. Methods of cleaning the cooling tower sprinkler and the results of their application on the tested samples of NVNPP

Метод	Эффективность	Преимущества	Недостатки
1. Вибрационного воздействия	30%	Безопасность для бетонных конструкций градирни	1. Большие трудозатраты 2. Частичное повреждение оросителя при демонтаже - монтаже. 3. Низкая эффективность 4. Выполняется на неработающей градирне
2. Криогенный бластинг	13%		1. Требуется разбор оросителя из-за неполного прохождения струи воздуха по высоте оросителя 2. Низкая эффективность
3. Гидромеханическая очистка	60%	1. Безопасность для бетонных конструкций градирни 2. Возможность производить очистку на работающей градирне	Отсутствует возможность очищать ороситель центральной зоны при работе на мощности
4. Пневмо-импульсный	50%	3. Демонтаж не требуется	Недостаточная эффективность
5. Гидрохимический	Более 70%	1. Демонтаж не требуется 2. Высокая эффективность 3. Возможность обработки труднодоступных зон 4. Укладывается в сроки ППР 5. Короткий срок окупаемости	1. Влияние на бетон. Требуется дополнительные мероприятия по защите бетона 2. Выполняется на неработающей градирне

Экономическая эффективность

Экономическая целесообразность выражается в снижении потерь выработки электроэнергии и определяется глубиной охлаждения градирни (температурой охлаждающей воды до и после ремонта). Приведение технического состояния градирни к фактическим номограммам ее охлаждающей способности – это основная цель ремонта, что в конечном итоге обеспечивает безопасную и экономичную работу [7].

В жаркий период года потери выработки электроэнергии на 1°C циркуляционной воды составляют 8–10 МВт. Температура

охлаждающей воды напрямую связана с КПД-циклом, следовательно, влияет на экономию топлива [8]. В результате проведения комплекса выполненных работ охлаждающая способность градирни после ремонта улучшилась, как минимум, на 4°C. При этом снижение потерь выработки (экономический эффект) составит 234 тыс. рублей/час (5,6 млн. рублей/сутки, 168 млн. рублей/месяц). Таким образом, срок окупаемости реагентного метода очистки оросителя не более 1,5 месяца.

Выполнение регулярной очистки оросителя при достижении установленных крите-

риев (80 кг/м^3) позволит снизить материальные затраты и значительно продлить срок его эксплуатации до замены. Примененный реагентный метод обеспечит соблюдение установленных сроков ППР, снизив риски задержки пуска энергоблока после ремонта.

Полнота мероприятий по организации ремонта и определение адекватного объема

ремонтных работ, выбор технологии очистки оросителя и обеспечение оптимального ВХР являются гарантией поддержания фактической, определенной балансовыми испытаниями охлаждающей способности градирни, и выработки электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Карандеева Н.В., Кузнецова Е.Г. Выбор оптимального водно-химического режима систем охлаждения АЭС с учетом природных свойств исходной воды. Расчет индексов стабильности исходной воды для АЭС при оценке склонности к накипеобразованию и коррозии. *Молодой ученый*. 2025;19(570):41–45. EDN DMRAXE. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/570/124811/> (дата обращения: 16.06.2025).

Karandeeva N.V., Kuznetsova E.G. Selection of the optimal water chemistry mode of NPP cooling systems taking into account the natural properties of the source water. Calculation of stability indices of source water for NPPs when assessing the tendency to scale formation and corrosion. *Young scientist*. 2025;19 (570):41–45. (in Russ). EDN DMRAXE. Available at: <https://moluch.ru/archive/570/124811/> (accessed: 16.06.2025). EDN DMRAXE.

2. Галанин А.В., Карандеева Н.В., Васильева С.Ю. Применение ингибиторов для предотвращения солеотложений в системах охлаждения АЭС. Выбор оптимального водно-химического режима с помощью установки моделирования. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2025;(1):96–112. EDN LOLZNP. <https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.07>

Galanin A.V., Karandeeva N.V., Vasilyeva S.Y. Use of inhibitors to prevent oxidation in cooling systems of Nuclear power plants. Selection of the optimal water chemistry regime using a model unit. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;(1):96–112. (in Russ). EDN LOLZNP. <https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.07>

3. Галанин А.В., Галанин А.В., Воробьев С.А., Карандеева Н.В. Проблемные вопросы ведения водно-химического режима системы основной охлаждающей воды на энергоблоках ВВЭР-1200. 55 лет безопасной эксплуатации АЭС с ВВЭР в России и за рубежом: Сборник докладов Международной научно-практической конференции, Воронеж, Нововоронежская АЭС, 23–27 сентября 2019 года. Воронеж: Научная книга, 2019. С. 201–206. EDN JYWOSW. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42505943&pff=1> (дата обращения: 16.06.2025).

Galanin A.V., Galanin A.V., Vorobyov S.A., Karandeeva N.V. Problematic issues of maintaining the water chemistry regime of the main cooling water system at WVER-1200 power units. 55 years of safe operation of NPPs with WVER in Russia and abroad: Collection of reports of the International scientific and practical conference, Voronezh, Novovoronezh NPP, September 23–27, 2019. Voronezh: Nauchnaya kniga, 2019. P. 201–206. (in Russ). EDN JYWOSW. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42505943&pff=1> (accessed 16.06.2025).

4. Галанин А.В., Воробьев С.А., Карандеева Н.В. Исследование ингибиторов солеотложений для ведения водно-химического режима системы основной охлаждающей воды с башенными испарительными градирнями. *Ядерная и радиационная безопасность*. 2019;(S1):80–84. EDN MZFQMY. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42880984_35608804.pdf (дата обращения: 16.06.2025).

Galanin A.V., Vorobev S.A., Karandeeva N.V. Investigation of scale inhibitors for a water-chemical mode of the main cooling water system with evaporative cooling towers. 2019;(S1):80–84. (in Russ). EDN MZFQMY. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42880984_35608804.pdf (accessed: 16.06.2025).

5. Поваров В.П., Витковский С.Л., Гончаров И.А., Галанин А.В. [и др.]. Химическая очистка теплообменного оборудования препаратом Biorenex. *Энергетик*. 2015;14–15. EDN TWVZBV. Режим доступа: <http://www.energetik.energy-journals.ru/index.php/EN/article/view/328> (дата обращения: 16.06.2025).

Povarov V. P., Vitkovsky S. L., Goncharov I. A., Galanin A.V. [et al.]. Chemical cleaning of heat exchange equipment with Biorenex preparation. (in Russ). Available at: <http://www.energetik.energy-journals.ru/index.php/EN/article/view/328> (accessed: 16.06.2025).

6. Нифталиев С.И., Клоков Г.В., Кузнецова Е.Г., Карандеева Н.В. Опыт применения модельной градирни для испытания эффективности ингибиторов накипеобразования и коррозии. *Безопасность ядерной энергетики : Сборник тезисов по материалам докладов XX Международной научно-практической конференции, Волгодонск, 19–20 сентября 2024 года*. Волгодонск: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2024. С. 41–43. EDN YAIYOO. Режим доступа: <https://openrepository.mephi.ru/server/api/core/bitstreams/97cff1a0-2faf-4aad-ba7e-31c756d477ad/content> (дата обращения: 16.06.2025).

Niftaliev S.I., Klokov G.V., Kuznetsova E.G., Karandeeva N.V. The experience of using a model cooling tower to test the effectiveness of scale formation and corrosion inhibitors. *Nuclear energy safety: a collection of abstracts based on the reports of the XX International Scientific and Practical Conference, Volgodonsk, September 19–20, 2024*. Vol-

godonsk: National Research Nuclear University «MEPhI», 2024. P. 41–43. (in Russ). EDN YAIYOO. Available at: <https://openrepository.mephi.ru/server/api/core/bitstreams/97cff1a0-2faf-4aad-ba7e-31c756d477ad/content> (accessed: 16.06.2025).

7. Шарифуллин В.Н., Бадриев А.И. Аэродинамические характеристики башенной градирни в условиях неравномерности распределения потоков воды и воздуха. Теплоэнергетика. 2019;(8):46–52. EDN ASVBWS. <https://doi.org/10.1134/S0040363619080083> (accessed: 16.06.2025).

Sharifullina V.N., Badriev A.I. Aerodynamic characteristics of the cooling tower under the nonuniform distribution of the water and air flows. Thermal Engineering. 2019;(8):46–52. (in Russ). EDN ASVBWS. <https://doi.org/10.1134/S0040363619080083>

8. Татарникова Н.А., Такташев Р.Н., Ондар А.Б. [и др.] Повышение энергоэффективности работы систем охлаждения ТЭС с башенными испарительными градирнями. Энергосбережение – теория и практика : Труды Одиннадцатой Всероссийской конференции с Международным участием, Москва, 10–14 октября 2022 года. Москва: Радуга, 2022. С. 26–29. EDN XCLTHZ. Режим доступа: <https://elibrary.ru/xclthz?ysclid=mfkvvu5jeo886824865> (дата обращения: 16.06.2025).

Tatarnikova N.A., Taktashev R.N., Ondar A.B. [et al.] Improving the energy efficiency of thermal power plant cooling systems with Tower Evaporative Cooling towers. energy saving – Theory and Practice: Proceedings of the Eleventh All-Russian Conference with International Participation, Moscow, October 10–14, 2022. Moscow: Raduga, 2022, pp. 26–29. (in Russ). EDN XCLTHZ. Available at: <https://elibrary.ru/xclthz?ysclid=mfkvvu5jeo886824865> (accessed: 16.06.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Поваров В.П. – формулировка и развитие ключевых целей и задач повышения эффективности работы башенной испарительной градирни, принятие ответственности за все аспекты работы;

Бакулин В.В. – идея проведения исследований методов очистки градирни, планирование и организация работ, сбор, систематизация, анализ данных, обобщение результатов, проведение сравнительного анализа эффективности различных методов очистки, формулировка выводов;

Карандеева Н.В. – химический контроль процесса очистки оросителя, анализ отложений и реагентов, интерпретация результатов исследования, написание и редактирование текста статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Владимир Петрович Поваров, доктор технических наук, директор НВАЭС, Нововоронеж, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-9092-9160>

e-mail: PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Владимир Викторович Бакулин, ведущий инженер по эксплуатации гидротехнических сооружений ТЦ-6 Нововоронеж, Российская Федерация.

e-mail: BakulinVV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Наталья Владимировна Карандеева, ведущий инженер по эксплуатации оборудования ХЦ, Нововоронеж, Российская Федерация.

e-mail: KarandeevaNV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Povarov V.P. – formulation and development of key purposes and objectives to improve the efficiency of the evaporative cooling tower taking responsibility for all aspects of the work;

Bakulin V.V. – the idea of conducting researches on cooling tower cleaning methods, planning and organization of works, collection, systematization, data analysis, generalization of results, comparative analysis of the effectiveness of various cleaning methods, formulation of conclusions;

Karandeeva N.V. – chemical monitoring of the cleaning process, sediment and reagent analysis, interpretation of research results, writing and editing the text of the article.

FUNDING:

The work is carried out without using external sources of financing

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Vladimir P. Povarov, Dr. Sci. (Engin.), Head of NVNPP, Novovoronezh, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-9092-9160>

e-mail: PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Vladimir V. Bakulin, Senior engineer of hydraulic structure operation of power unit №6 turbine department, Novovoronezh, Russian Federation.

e-mail: BakulinVV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Natalya V. Karandeeva, Senior engineer of chemical department equipment operation, Novovoronezh, Russian Federation.

e-mail: KarandeevaNV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Поступила в редакцию / Received 15.05.2025

После доработки / Revision 24.07.2025

Принята к публикации / Accepted 29.07.2025

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-06>

EDN MXTTJJ

Оригинальная статья / Original paper



**Анализ высокочастотной составляющей нейтронного шума на
динамических режимах ВВЭР-1200**

Г.В. Аркадов¹   , М.Т. Слепов²  

¹ Некоммерческое партнерство содействию развитию системной инженерии «Райз», г. Москва,
Российская Федерация, arkgen47@gmail.com

² Филиал Акционерного общества «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на
атомных станциях» «Нововоронежская атомная станция», г. Нововоронеж, Воронежской области,
Российская Федерация, slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Аннотация: В статье впервые поднимается проблема о возможности использования высокочастотной составляющей нейтронного шума для контроля состояния ТВС и твэл во время эксплуатации, т.к. долгое время исследования нейтронного шума ограничивались частотой 50 Гц. В краткой исторической справке представлены основные моменты и этапы развития нейтронно-шумового контроля, а также персоналии отдельных ученых, внесших фундаментальный вклад в развитие нейтронно-шумовой диагностики. На примере данных Нововоронежской АЭС, полученных при динамических испытаниях в 2022 г., авторы показывают возможность оценки собственных колебаний органов регулирования СУЗ, как функции частота-глубина погружения в активную зону. Данная зависимость позволяет построить альтернативный канал контроля положения органов регулирования СУЗ. На основе спектральных оценок высокочастотного нейтронного шума обосновывается возможность выявления режима кипения теплоносителя с локализацией места по высоте ТВС. Впервые приводится оценка собственных частот колебаний твэл (частей твэл) на основе данных, полученных непосредственно во время эксплуатации. Собственные частоты представлены в виде конкретных числовых значений, а не в виде частотного диапазона, полученного по результатам стендовых испытаний. Представлен критический подход к проблеме предварительных испытаний макетов ТВС на различных стендах в части достаточности информации и ее обоснованности. Для удобства визуализации и сжатия информации вводится новое представление каскада спектров в виде контурных графиков, позволяющее максимально эффективно выявить общие закономерности на большом количестве данных. Аргументируется необходимость дальнейших исследований по нейтронно-шумовой тематике на действующих АЭС в связи с внедрением новой конструкции ТВС (ТВС-5), имеющей существенные отличия.

Ключевые слова: нейтронный шум, датчик прямого заряда, вибрация, активная зона, ТВС, твэл, автоспектральная плотность мощности, когерентность, кипение, органы регулирования, стендовые испытания.

Для цитирования: Аркадов Г.В., Слепов М.Т. Анализ высокочастотной составляющей нейтронного шума на динамических режимах ВВЭР-1200. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(3):57–76. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-06>

For citation: Arkadov G.V., Slepov M.T. Analysis of a high-frequency component of neutron noise in VVER-1200 dynamic modes. *Nuclear Safety*. 2025;15(3):57–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-06>

Analysis of a high-frequency component of neutron noise in VVER-1200 dynamic modes

Gennady V. Arkadov¹   , Mikhail T. Slepov²  

¹ «Rise» non-profit partnership for system engineering development support, Moscow, Russian Federation
arkgen47@gmail.com

² Novovoronezh Nuclear Power Plant the branch of the Russian Concern for the Production of Electric and Thermal Energy at Nuclear Power Plants, Novovoronezh, Voronezh Region, Russian Federation
slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Abstract: For the first time, the article raises the problem of the possibility of using the high-frequency component of neutron noise to monitor the state of fuel assemblies and fuel rods during operation, since for long-time neutron noise research was limited to a frequency of 50 Hz. A brief historical summary presents the main points and stages of the development of neutron noise control, as well as the personalities of individual scientists who have made fundamental contributions to the development of neutron noise diagnostics. Using the example of data from the Novovoronezh NPP obtained during dynamic tests in 2022, the authors show the possibility of estimating the natural fluctuations of the control bodies of the control system as a function of frequency-depth of immersion in the core. This dependence makes it possible to build an alternative channel for monitoring the position of the regulatory authorities. Based on spectral estimates of high-frequency neutron noise, the possibility of detecting the boiling mode of the coolant with localization of the location by the height of the fuel assembly is substantiated. For the first time, data (frequency composition) on possible natural fluctuations of fuel rods (parts of fuel rods) measured directly during operation is presented. These values are given in the form of specific values, and not in the form of a frequency range calculated based on the results of bench tests. A critical approach to the problem of preliminary tests of fuel assembly layouts at various stands in terms of the sufficiency of information and its validity is presented. For the convenience of visualization and compression of information, a new representation of the cascade of spectra is introduced in the form of contour graphs, which makes it possible to identify common patterns on a large amount of data as efficiently as possible. The necessity of further research on neutron noise issues at existing nuclear power plants is argued in connection with the introduction of a new fuel assembly design (TVS-5), which has significant differences.

Keywords: neutron noise, direct charge sensor, vibration, core, fuel assemblies, fuel elements, autospectral power density, coherence, boiling, control controls, bench tests.

Введение

Долгое время исследование нейтронных шумов считалось научным «вольнодумством» отдельных ученых и «побочным» результатом реакторных исследований. Однако по мере получения новых знаний, результаты таких исследований стали активно использоваться для диагностики состояния активных зон (АЗ) ВВЭР. В середине XX в. появились первые фундаментальные работы, где были обобщены основные достижения в анализе нейтронных шумов для подкритических реакторов. Теоретически и экспериментально было продемонстрировано, что на основе определенных статистических данных, полученных с помощью дискретных сигналов нейтронных датчиков, можно описать кинетические параметры активных зон. Это позволило разработать теорию нейтронного шума подкритического реактора.

Результаты исследований применялись на различных этапах разработки АЗ на критических сборках. В Физико-энергетическом институте (Обнинск) исследования шумов проводились группой под руководством А.И. Могильнера [1] (С.А. Морозов, А.О. Скоморохов [1,2]), а в Институте атомной энергии имени И.В. Курчатова (Москва) научная работа осуществлялась под руководством В.В. Булавина [3,4] (А.С. Кужил,

В.И. Митин, А.Е. Савушкин). Следует отдельно выделить венгерскую школу по нейтронным шумам: Г. Кошай, автор теории нейтронного шума реактора с кипящим теплоносителем; Т. Катона, разработавший совместно с коллегами Г. Пором и Л. Меско нейтронно-температурную модель с аксиальной пространственной зависимостью [5,6].

Безусловно, работы по шумовой тематике в СССР, затем и в Российской Федерации запаздывали, а с учетом аутсайдерских позиций российской электроники и дальнейшей деградации экономики России, исчезли из планов работы базовых научно-исследовательских центров.

Начиная с «нулевых» годов XXI в. проблематикой нейтронного шума занимается исследовательская группа под руководством В.И. Павелко в составе Научно-технического центра «Диапром» (Москва), где разрабатываются и внедряются отечественные системы виброшумового мониторинга с нейтронно-шумовыми каналами для всей линейки отечественных реакторов ВВЭР (ВВЭР-440, ВВЭР-1000, ВВЭР-1200, ВВЭР-ТОИ). Благодаря работам В.И. Павелко [4,7,8] были разработаны алгоритмы обработки сигналов нейтронного шума, позволяющие идентифицировать аномальные состояния реакторной установки до

того момента, когда дефект будет обнаружен штатными средствами контроля, что с полным правом позволяет говорить о мировом уровне российской нейтронно-шумовой школы.

Однако, несмотря на наличие передовых теоретических работ по поднятой проблематике, вопросы прикладных исследований, т.е. непосредственно прямого реакторного эксперимента, остались вне сферы научных интересов отечественных и зарубежных ученых. Необходимость практических исследований обуславливается, прежде всего, сложностью интерпретации выявляемых с помощью шумовых методов разнообразных аномалий, необходимостью точной настройки различных моделей, существенными различиями в спектральных образах оборудования не только разных проектов РУ, но и однотипных блоков в пределах одной АЭС. Указанные выше проблемы невозможно решить только с помощью теоретических или расчетных методов, а также с использованием программных средств имитационного моделирования.

Отдельно необходимо остановиться на ограничении ранее изучаемого в экспериментах, диапазона нейтронных шумов, как правило, частотой 50 Гц, что объясняется, с одной стороны, инертностью датчиков прямого заряда (ДПЗ), с другой отсутствием высокочувствительных измерительных средств токовых сигналов ионизационных камер (ИК) и ДПЗ, что нашло отражение даже в авторских монографиях [7,8]. С появлением технических средств прецизионного класса, внесением изменений в конструкцию ДПЗ и разработкой авторами методологии многоканальных синхронизированных измерений (подробнее источники [7–10]) появилась возможность оценки нейтронных шумов в высокочастотном диапазоне. Так, в источнике [8] представлены некоторые спектральные оценки нейтронного шума в высокочастотном диапазоне, а в [10] доказана возможность использования высокочастотной составляющей нейтронного шума для оценки состояния АЗ. В представленной статье делается первая попытка подробно исследовать частотный диапазон нейтронного шума от 50 Гц до 200 Гц, который опти-

мален, по мнению авторов, для выделения, а впоследствии и оценки, вибрационного состояния твэл. Материал статьи целиком основан на анализе данных, полученных во время проведения динамических испытаний на энергоблоке 1 Нововоронежской АЭС-2 в 2022 г.

Тепловыделяющая сборка как объект нейтронно-шумового контроля

Активная зона реакторной установки (РУ) ВВЭР-1200 представляет собой совокупность из 163 тепловыделяющих сборок (ТВС) и 121 органа регулирования (ОР) системы управления и защиты (СУЗ), установленных внутри корпуса реактора в соответствии с картограммой загрузки активной зоны (рис. 1). Дистанционирование ТВС обеспечивается посадкой концевых деталей в плите блока защитных труб (БЗТ) с одной стороны и в днище шахты внутрикорпусной (ШВК) с другой. Предотвращение всплытия и уменьшение вибрации ТВС обеспечивается посредством упругого поджатия подпружиненных головок ТВС крышкой реактора через БЗТ.

Регулирование мощности активной зоны осуществляется перемещением пучка поглощающих элементов (ПЭЛ) с помощью ОР СУЗ в направляющих каналах ТВС. Аварийная защита осуществляется падением ПС СУЗ по сигналу АЗ под действием силы тяжести. Пучок ПЭЛ представляет собой конструкцию из 18 цилиндрических ПЭЛов, содержащих поглощающий материал в виде титаната диспрозия (Dy_2TiO_5) – керамика из семейства титанатов, в нижней части и карбида бора (B_4C) с природным содержанием изотопа ^{10}B , в верхней части, и закрепленных с помощью пружин индивидуальной подвески на захватной головке.

Все ОР СУЗ разбиты на 12 групп, каждая из которых содержит от 6 до 12 ОР СУЗ. ОР СУЗ каждой группы перемещаются одновременно. Определена неизменная (штатная) последовательность движения групп. Извлечение групп производится в порядке номеров от 1 до 12, погружение – в обратном порядке (подробнее [11]).

В новом энергоблоке ВВЭР-1200, в отличие от серийного блока ВВЭР-1000, активная зона претерпела следующие изменения:

- увеличена масса топлива за счет увеличения высоты топливного столба, уменьшения диаметра центрального отверстия и увеличения диаметра собственно топливной таблетки;

- увеличено число групп СУЗ и соответственно изменился регламент управления СУЗ, в частности уменьшилась глубина погружения ОР СУЗ в активную зону в номинальном режиме;

- применены перемешивающие решетки в верхней части ТВС;

- использована антивибрационная нижняя решетка (источник [12]).

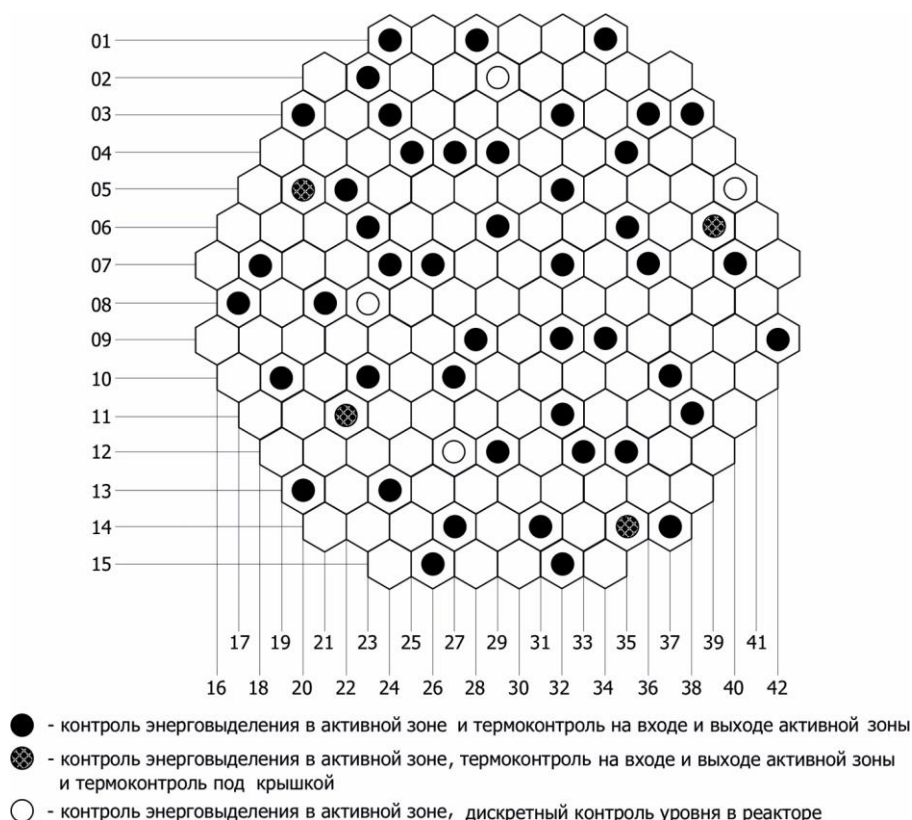


Рисунок 1. Компоновка активной зоны ВВЭР-1200 с размещением датчиков контроля внутризонного нейтронного потока

Figure 1. Layout of the VVER-1200 core with placement of sensors for monitoring the in-core neutron flux

Функции контроля параметров активной зоны РУ выполняет система внутриреакторного контроля (СВРК). Главной функцией СВРК является обеспечение безопасной и экономичной эксплуатации реактора путем сбора, обработки и представления информации о состоянии активной зоны. На рисунке 1 представлено размещение измерительных каналов (КНИ) СВРК в АЗ реактора по 7 датчиков прямого заряда (ДПЗ) в каждой, что обеспечивает контроль энерговыделения в 378 точках АЗ. В работах [8,10] представлены схемы коммутации технических средств, а в [9,10,13,14] описаны алгоритмы получения информации о состоянии ТВС

при совместном использовании штатных систем контроля и мобильных измерительных комплексов. В данной статье авторы акцентируют внимание читателей на том, что наличие мобильных измерительных систем на современных блоках, является необходимостью, так как опыт использования таких технических средств совместно со штатными (проектными) системами свидетельствует о возможности решения целого ряда задач от получения «тонкой структуры» нейтронных шумов до точной настройки каналов различных программно-технических комплексов. Гибкость в использовании мобильных систем позволяет работать с различными

ми типами сигналов как для получения экспресс-оценок о состоянии оборудования, так и использования различных методов предиктивной аналитики, предоставляющих возможность получения долгосрочных трендов о состоянии оборудования.

Возвращаясь к подробному описанию конструктивных особенностей ТВС для ВВЭР-120 следует сказать, что каждая ТВС содержит 312 цилиндрических тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), расположенных с помощью дистанционирующих решеток по углам равномерной треугольной сетки и концевые детали. Под оболочкой ТВЭЛОВ находится керамическое ядерное топливо в виде таблеток из диоксида урана, в котором происходит цепная ядерная реакция. ТВЭЛы омываются теплоносителем, который обеспечивает необходимый теплосъем с поверхности ТВЭЛОВ и замедление быстрых нейтронов. Для выравнивания поля энерговыделения по радиусу активной зоны, уменьшения коэффициента размножения в начале цикла выгорания топлива и обеспечения работы реактора в области отрицательных коэффициентов реактивности по температуре теплоносителя используются тепловыделяющие элементы с урангадолиниевым топливом (ТВЭГи). В качестве интегрированного выгорающего поглотителя используется гадолиний в виде оксида гадолиния (Gd_2O_3) с естественным содержанием изотопов. Концентрация выгорающего поглотителя в ТВЭГах выбирается такой, чтобы поглотитель практически полностью выгорал в течение одной топливной загрузки (по материалам источника [11]). На рисунке 2 представлен общий вид ТВС для ВВЭР-1200 с краткими характеристиками и расположением основных деталей, а на рисунке 3 показано взаимное расположение ДПЗ относительно ТВС в АЗ (по материалам [12]).

С точки зрения эксплуатационного контроля крайне желательно иметь информацию как об амплитудах вибрации ТВС, так и о частотном составе. На данный момент не существует методов, позволяющих измерить (рассчитать) амплитуду вибрации ТВС в абсолютных единицах во время работы энергоблока на мощности. В работе [15] предложен способ оценки вибрации ТВС по трем

ДПЗ в относительных единицах, но ввиду его непрактичности и сложности реализации, данный метод не используется на АЭС. Тем не менее, частотный состав вибрации можно измерять, используя единственный метод, показавший свою эффективность – анализ нейтронного шума ДПЗ. Главный конструктор РУ ВВЭР-1200 АО ОКБ «Гидропресс» проводит серии испытаний на различных стендах, имитирующих рабочие условия для макетов ТВС всех работающих блоков. К сожалению, несмотря на несомненную научную ценность, указанные источники не находятся в открытом доступе, что делает затруднительным цитирование необходимых данных. Поэтому авторы помимо источника будут приводить полную информацию об источнике цитирования, включая номера страницы и разделов (при наличии).

Согласно источнику [12], собственные частоты ТВС, полученные при проведении виброиспытаний на воздухе, т.е. без учета присоединенной массы теплоносителя, составляют величины сведенные в таблице 1 (источник [12], стр. 53, табл. 5.7.1). Приведенные данные коррелируют с другим источником [16] (табл. 2), что позволяет сделать вывод об изгибных колебаниях ТВС в диапазоне частот от 5 до 6 Гц. Несомненно, никакими стендовыми испытаниями и/или средствами имитационного моделирования невозможно воспроизвести рабочие режимы АЭС. Поэтому необходима валидация полученной таким образом информации на реальных объектах и при рабочих режимах.

Как было отмечено ранее, нейтронный шум ДПЗ свыше 50 Гц долгое время не исследовался. Считалось, что ДПЗ в силу своей инертности не регистрирует колебания нейтронного потока выше указанной частоты. Однако в реальности это не так. В работе [8] авторы приводят убедительные данные о наличии высокочастотных составляющих в сигналах нейтронного шума ДПЗ, вплоть до максимально возможной частоты регистрации (при частоте оцифровки исходного сигнала 1024 Гц), т.е. до частоты 512 Гц. В таблице 3 представлены данные о частотах вибрации макета ТВС-5 (конструктивный

аналог штатной ТВС ВВЭР-1200) в диапазоне от 50 до 512 Гц (по источнику [17], стр. 27, табл. 6). Подробное рассмотрение результатов исследований представленных как в [12], так и в [17], не является темой статьи, но авторы считают, что используемые методы спектрального оценивания не являются оптимальными, т.к. выделение спектральных особенностей происходит не в виде отдельных пиков (максимумов), а в ви-

де «интервальным» оценкам собственных частот (на примере данных табл. 3 интервал может достигать до 100 Гц). В реальности совместные колебания трубных пучков имеют разброс по частоте, не превышающий 10 Гц. Более подробно об эффективности использования различных весовых функций, длине выбранной для анализа временной реализации, количестве необходимых осреднений и др. можно ознакомиться в [18].

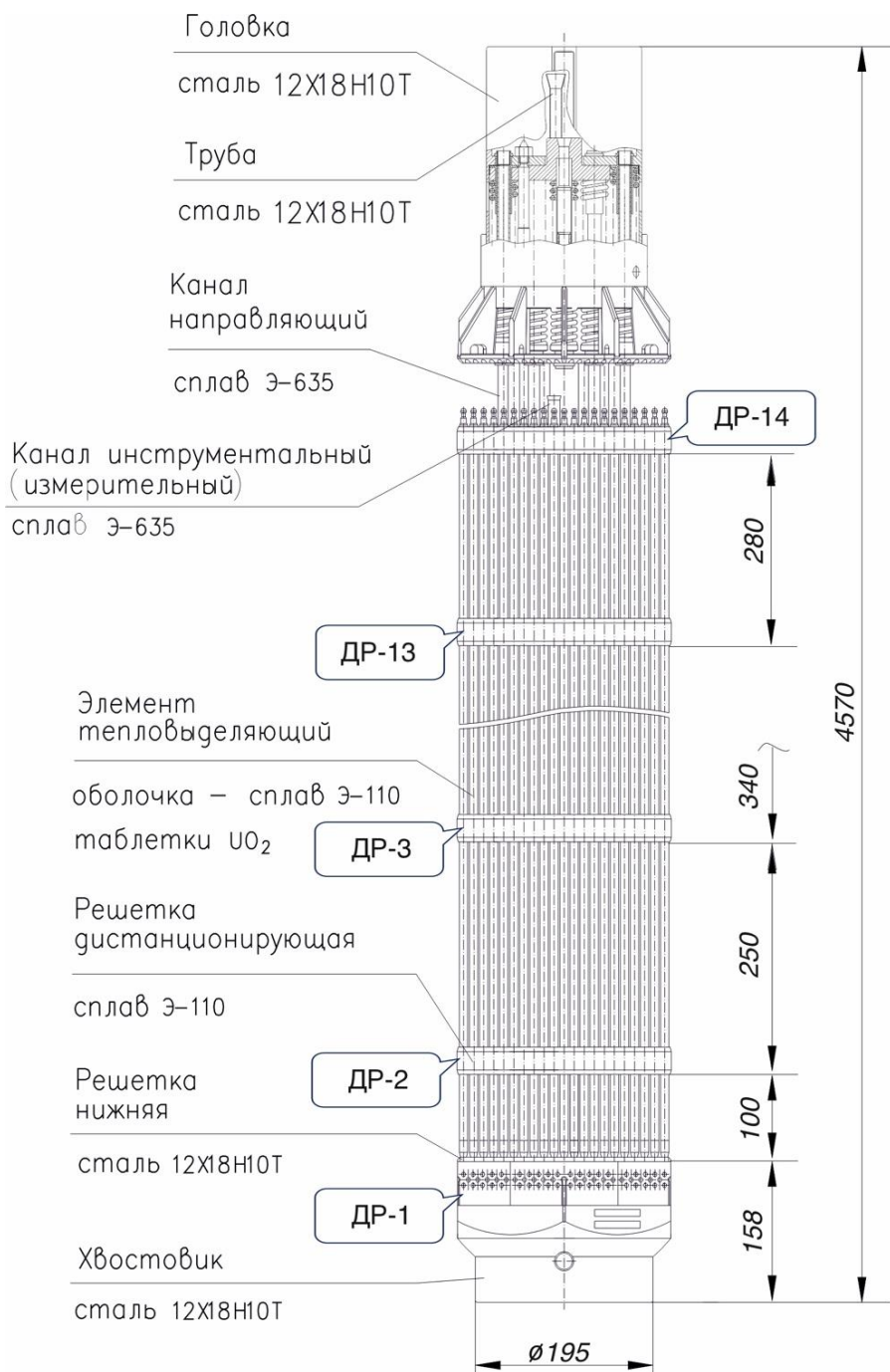


Рисунок 2. Общий вид и конструктивные особенности ТВС ВВЭР-1200
Figure 2. General view and design features of the VVER-1200 fuel assemblies

Таблица 1. Собственные частоты колебаний ТВС (по источнику [11] стр. 53, Табл.5.7.1 – Вибрационные характеристики макета ТВС-2006 как целого)**Table 1.** Natural frequencies of fuel assembly vibrations (according to reference [11], p. 53, Table 5.7.1 – Vibration characteristics of the TOA-2006 model as a whole)

Частота, Гц	Коэффициент демпфирования, % от критического	Форма
5,3	1,1	Первая изгибная
8,2	1,3	Первая крутильная
10,8	2,2	Вторая изгибная
16,8	1,4	Вторая крутильная
17,5	1,1	Третья изгибная
23,1	0,7	Четвертая изгибная
25,0	0,9	Третья крутильная
29,5	0,9	Пятая изгибная
33,0	1,1	Четвертая крутильная

Таблица 2. Собственные частоты колебаний макета ТВС в зависимости от степени поджатия на воздухе и в воде (по источнику [15])**Table 2.** Natural frequencies of the fuel assembly model depending on the compression degree in air and water (according to reference [15])

Среда	Осевое усилие, N, кН	Поджатие пружин λ , мм	Собственные частоты, Гц		
			f_1	f_2	f_3
Воздух, $T = 30^\circ C$	0	0	5,8	9,9	16,0
	6,3	10,8	6,7	10,2	17,9
	13,1	25,8	6,7	10,2	17,9
Вода, $T = 30^\circ C$	0	0	3,9	7,4	11,2
	6,3	10,8	4,8	7,4	11,8
	13,1	25,8	5,2	7,4	11,8

Таблица 3. Частоты (по источнику [17] стр. 27, табл. 6 – Частоты вынужденных и собственных колебаний виброизмерительных твэлов)**Table 3.** Frequencies (according to reference [17], p. 27, Table 6 – Frequencies of forced and natural vibrations of vibration measuring transducers)

Пролеты	Диапазон частот, Гц	
	Вынужденные колебания в теплоносителе	Собственные колебания в воздухе
ДР1-ДР2	от 470 до 650	не выявлены
ДР2-ДР3	от 210 до 230	не выявлены
ДР4-ДР5, ДР11-ДР12	от 80 до 150	от 94 до 136
ДР12-ДР13	от 110 до 180	от 163 до 178
ДР13-ДР14	от 250 до 420	от 358 до 512

Особенности нейтронно-шумового контроля ТВС при динамических режимах

Долгое время стратегия спектральной оценки различных сигналов базировалась из условия их стационарности, т.е. применительно к реальным объектам, таким как роторные и поршневые машины, механизмы, реакторные установки и др., статичных режимов работы [17]. Данное обстоятельство было вызвано относительно «медленным» режимом работы аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и их малой разрядно-

стью, что приводило «размытости» спектральных максимумов, соответственно снижало ценность таких оценок. Ситуация изменилось с появлением компактных и быстродействующих сборщиков данных прецизионного класса, где достижима частота дискретизации сигнала до 204,8 кГц на канал с разрядностью в 24 бита с неограниченным (ограничение только по физическим размерам носителя информации) временем записи (по материалам источника [10]).

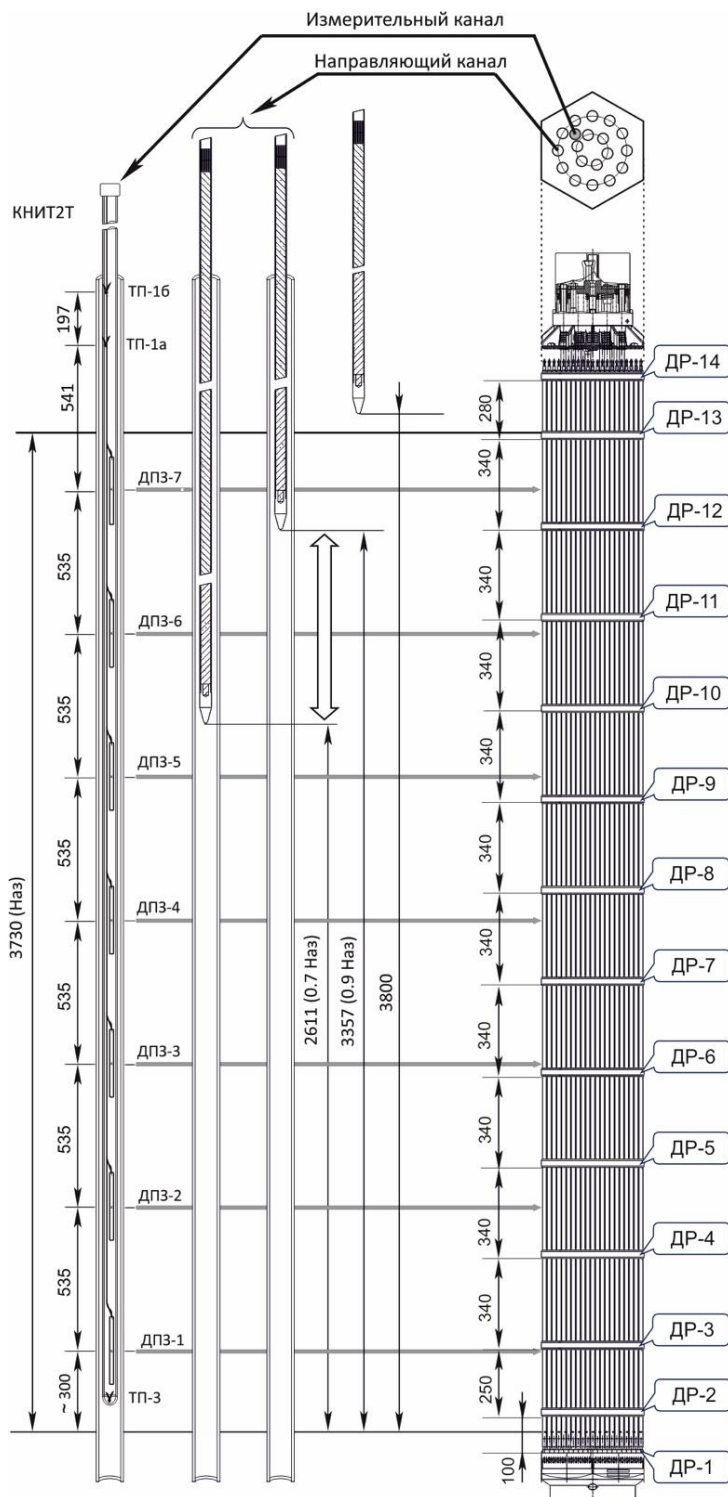


Рисунок 3. Расположение ДПЗ относительно ТВС
Figure 3. Location of the direct charge sensors relative to the fuel assembly

В работах [8–10] авторами представлены уникальные возможности данных технических средств и варианты их использования в условиях действующей АЭС. Регулярное использование измерительных средств и обобщение накопленного опыта, позволи-

ли разработать новую методику спектрального оценивания шумовой составляющей различных сигналов при нестационарных режимах эксплуатации оборудования. Интерес авторов именно к динамическим режимам понятен и закономерен.

Во-первых, любые отклонения от стационарности приводят к изменению технологических параметров, таких как температура, давление, расход и т.д., что неизбежно оказывает/не оказывает влияние на частоты в спектрах. Таким образом, отслеживая «дрейф» частоты, в зависимости от изменения технологических параметров, можно с определенной степенью уверенности говорить о природе явления, вызвавшего этот резонанс. Очень показателен пример, представленный в источнике [19], где природа резонанса 6,14 Гц объяснялась чисто механическими колебаниями ТВС, т.к. указанный максимум имел постоянную частоту при изменении температуры теплоносителя. Отсутствие связи между частотой колебаний и температурой (давлением) теплоносителя является отличительным признаком механической природы колебательного процесса в отличие от виброакустических эффектов, описанных в источнике [7]. Частота 6,14 Гц совпадает с частотами колебаний ТВС, представленным в таблицах 1 и 2 и соответствует первой гармонике колебания ТВС («Первая изгибная» по терминологии источника [12]). Из представленного примера очень хорошо видно, что в любом случае данные, полученные в результате стендовых испытаний, будут расходиться с данными, полученными при реальной эксплуатации.

Во-вторых, в переходных режимах в работу вводится (выводится) большое количество оборудования, что так же существенно расширяет охват шумового процесса, позволяют получать новые закономерности для комплексного изучения и анализа. И наконец, в-третьих, по статистике максимальное количество аномальных ситуаций, как правило, возникает именно на переходных (динамических) режимах и иметь условную бездефектную спектральную характеристику очень важно для своевременной идентификации различных аномалий.

Не смотря на все описанные выше преимущества спектральных оценок при переходных режимах, долгое время не удавалось решить главную проблему, а именно представление результатов анализа в динамике. Различные исследователи подходили к ре-

шению данной задачи разными способами. Например, В.И. Павелко ввел представление в виде «водопада спектров», где спектральные оценки выстраивались друг за другом на трехмерном графике (подробнее работы [1,8,14,15]). Данный способ хорошо зарекомендовал себя, когда для отражения динамического режима требовалось 20, максимум 25 спектров. Когда же для анализа необходимо существенно больше спектральных оценок (более 100), выделение особенностей становится затруднительным. Действительно если обратимся к практическому примеру, динамическим испытаниям на Нововоронежской АЭС-2 в 2022г, то получим следующие значения, при частоте дискретизации 1024 Гц и длине непрерывной записи более 8 часов, количество отсчетов (мгновенных значений измеряемого параметра) будет равно 31111164. Если ограничить время расчета спектральной оценки отрезком в 100 сек, то общее количество спектров будет 303. Никакими «водопадами спектров» организовать представление в компактной и наглядной форме практически невозможно.

В работе [10] впервые предложен новый способ представления большого количества спектральных оценок в сжатом и интуитивно понятном виде. Суть метода понятна из рисунка 4б, когда области с примерно равными значениями спектральной плотности объединяются и окрашиваются в один цвет. В сущности, предложенное авторами отображение спектральных характеристик, повторяет методику воспроизведения рельефа на географических картах, когда высота гор (или глубины океанов) окрашиваются в разные цвета в зависимости от реальных значений. В нашем случае цветом будет кодироваться амплитуды, тогда все 303 рассчитанных спектра создают уникальную картину шумовых процессов в динамике (спектральное поле).

На рисунке 4б воспроизведено спектральное поле нейтронного шума ДПЗ на горизонте 1 ТВС с координатами 02-23 во время динамического режима при изменении мощности в режиме 96%-56%-96% (подробнее работы [20,21]).

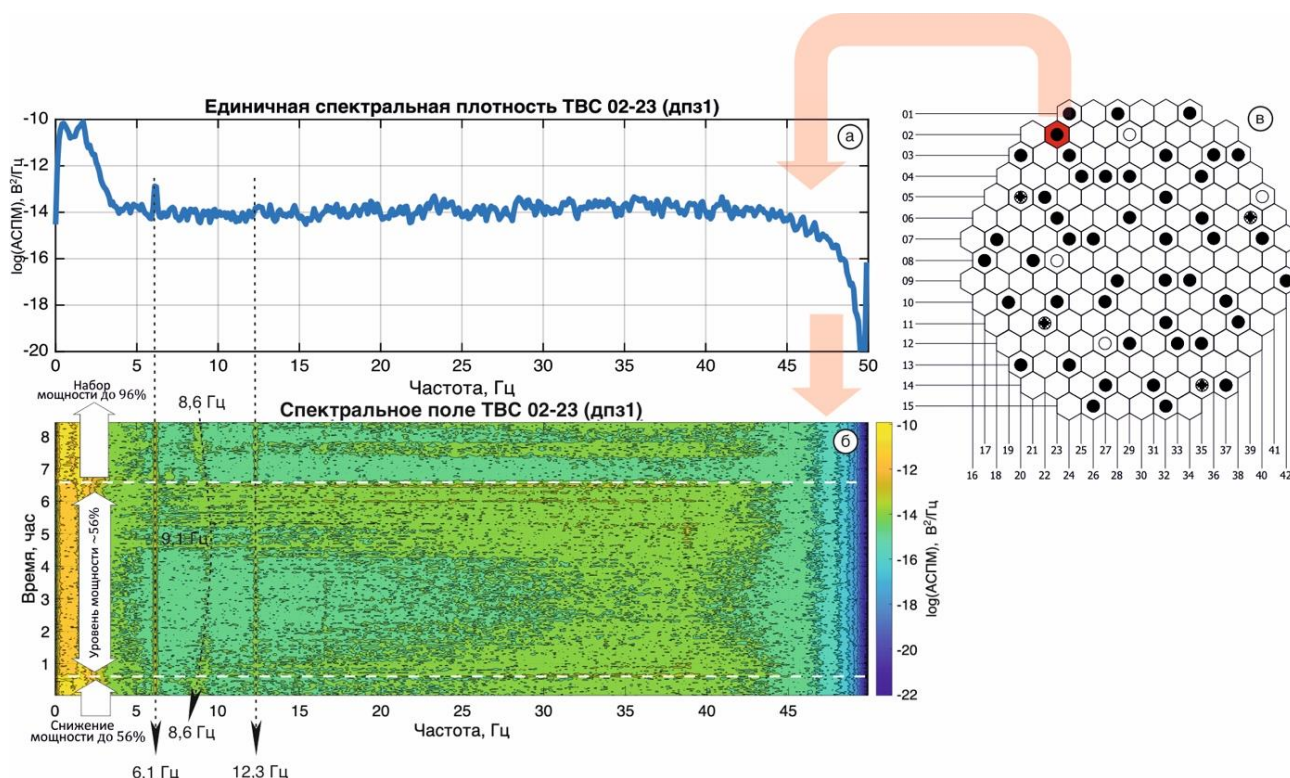


Рисунок 4. Общий вид спектрального поля для единичного датчика прямого заряда:
 а – единичный спектр нейтронного шума, б – спектральное поле за время эксперимента и
 в – картограмма АЗ с выделенной ТВС, участвующей в эксперименте
Figure 4. General view of the spectral field for a single direct charge sensor: а – a single spectrum of neutron noise,
 б – the spectral field during the experiment, and в – a cartogram of the core with a dedicated fuel assembly
 participating in the experiment

Представление динамической информации в виде спектрального поля позволяет однозначно идентифицировать природу колебательного процесса. Так, например, неизменность (прямая линия) на частоте 6,14 Гц при изменении мощности РУ (температуры теплоносителя) говорит о механической природе, а плавное изменение частоты с 8,6 Гц до 9,1 Гц и обратно о гидродинамическом источнике, т.е. об акустической стоячей волне (подробнее источник [7]). Частота 12,3 Гц соответствует второй гармонике колебаний ТВС.

Анализ высокочастотного шума ДПЗ

Для первоначальной оценки высокочастотного шума и определение физической природы выявляемых резонансов, целесообразно использовать представление информации в виде спектрального поля при динамических режимах. Так, на рисунке 5 представлено спектральное поле нейтронного шума для ДПЗ сборки 02-23 на горизонте 7. Спектральные поля для других ДПЗ выгля-

дят аналогично рисунку 6, поэтому для упрощения восприятия информации, авторы ограничатся только одним представлением. Это первое представление высокочастотной составляющей нейтронного шума в виде спектрального поля, т.к. ранее авторы ограничивались диапазоном до 50 Гц.

Максимумы на частотах 100 Гц и 150 Гц это помехи от воздействия питающей сети. Резонансы на частотах 106,2; 108,3 Гц и 110,9 Гц представляют явный интерес. Прежде всего, на примере резонанса 106,2 Гц хорошо заметна его анизотропия от воздействия температуры при переходном режиме, т.е. колебания на этой частоте имеют явно механическую природу. С другой стороны, выявлено плавное возрастание частоты со значения 108,3 Гц до 110,9 Гц, что не позволяет сделать вывод о гидродинамическом возбуждении указанного резонанса, т.к. при увеличении температуры теплоносителя частота таких резонансов должна уменьшаться (подробнее источники [1,10]). В рассматриваемой области происходит пе-

реход энергоблока с уровня мощности 56% до 96%, поэтому температура теплоносителя должна возрастать. Рядом с ячейкой 02-23 расположена ячейка с координатами 03-24 в которой размещен регулирующий ОР группы 11 (источник [22]), поэтому логично предположить, что вибрация кластерного пучка ПЭЛ и вызывает изменения реактивности, регистрируемое ДПЗ на горизонте 7. Для доказательства данной гипотезы рассмотрим модель ОР как математического маятника, период колебания которого определяется формулой (1) по источнику [23]:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (1)$$

где T – период колебаний,

l – длина математического маятника,

g – ускорение свободного падения.

Исходя из соотношения (2), формула (1) преобразуется в зависимость частоты от изменения длины математического маятника (3):

$$T = \frac{1}{f} \quad (2)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}, \quad (3)$$

где f – частота колебаний.

Исходя из формулы (3) можно утверждать, частота колебаний имеет гиперболическую зависимость при изменении длины математического маятника, с увеличением частоты колебаний при уменьшении длины математического маятника.

При детальном рассмотрении (крупный масштаб – выноска на рис. 5), хорошо видно по кривой 1 изменение частоты от времени. Учитывая, что в указанный временной интервал происходил процесс набора мощности энергоблоком, то ОР перемещались вверх, следовательно, частота должна уве-

личиваться (в соответствии с формулой (3)). Таким образом, кривая 1 описывает гиперболическую зависимость «перемещение ОР СУЗ – изменение частоты». Далее, на выноске хорошо видно, что фактически удалось зафиксировать два разных процесса. Один, (кривая 1) предположительно колебания ОР СУЗ в соседней ячейке с координатами 03-24 (изменение частоты 109,4 Гц – 110,7 Гц), другой (кривая 2) вероятно колебания еще одного ОР, который длительное время был неподвижен, но в самом конце записи начал извлекаться (конечная частота 111,0 Гц). В настоящее время трудно сделать точную привязку к конкретному ОР. Авторы, предполагают, что фактически можно отслеживать перемещение ОР с частот $\sim 106 \div 107$ Гц. Интерполировав исходную гиперболу (кривая 1) в область более низких частот (пунктирная кривая 3), можно увидеть скачкообразное изменение частоты в районе 106 Гц, что, скорее всего, соответствует началу процесса увеличения мощности энергоблока. Отсутствие явно выраженных максимумов на спектральном поле в диапазоне 106 Гц $\div$ 109 Гц может объясняться двумя обстоятельствами. Первое, перемещение ОР происходит на нижних горизонтах и не регистрируется ДПЗ7. Второе, возможно мощность реактора не достигла порогового значения, с которого возможна надежная регистрация нейтронных шумов.

В любом случае приведенные выше экспериментальные данные позволяют создать новый независимый канал контроля реального положения ОР. Выполнив калибровку изменение частоты выделенного резонанса от перемещения ОР СУЗ в единицах длины от верха АЗ, можно получить зависимость, позволяющую с достаточной степенью точности определять реальное положение ОР в АЗ, что существенно расширяет возможности нейтронно-шумового контроля и повышает эксплуатационную безопасность.

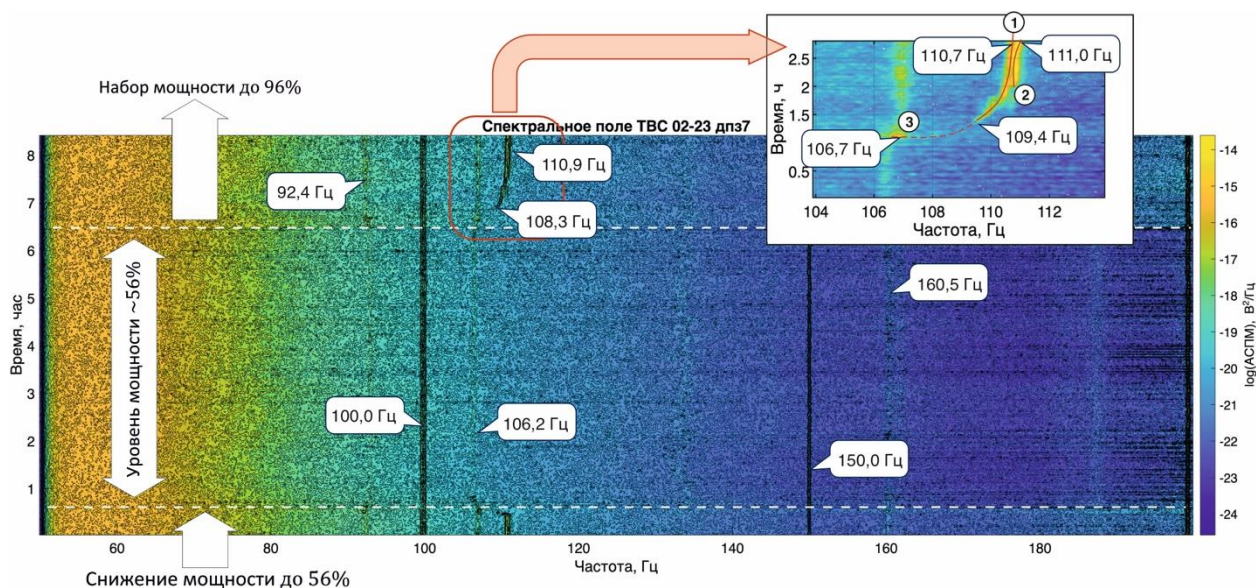


Рисунок 5. Спектральное поле ДПЗ на горизонте 7 ТВС с координатами 02-23 за 8,5 часов непрерывной записи при динамическом режиме снижения/повышения мощности (96%-56%-96%)

Figure 5. The spectral field of the direct charge sensors on the horizon of 7 fuel assemblies with coordinates 02-23 for 8.5 hours of continuous recording under the dynamic mode of decreasing power increase (96%-56%-96%)

Введенное авторами представление нейтронно-шумовой информации в виде спектрального поля, безусловно, удобно для восприятия общей картины и выявления глобальных закономерностей, но для более детального анализа необходим переход к спектральным оценкам. В связи с широким распространением мобильных анализаторов сигналов различного назначения и специализированного программного обеспечения сложилось неверное представление о сути спектрального преобразования и об используемых единицах (более подробно источники [18,24–26]). Так на рисунках 6 и 7 представлены рассчитанные спектры всех ДПЗ для сборки 02-23 (рис. 6) и для сборки 14-37 (рис. 7) для разных уровней мощности РУ – 56% и 96% от номинального значения. Единицей измерения является «автоспектральная плотность мощности (АСПМ)» с размерностью, исходные единицы временного сигнала (В, мкА, мм и т.д.) деленные на частоту в квадрате, нашем случае – $A^2/\text{Гц}$.

Очень частой ошибкой является попытка оценить размах колебаний в абсолютных единицах на определенной частоте исходя из спектральных характеристик, т.е. интерпретируя спектральную плотность как амплитуду, что в корне неверно. Реально возможна

только интегральная оценка энергии процесса в некотором, строго определенном диапазоне частот, т.к. квадрат амплитуды – это энергетическая характеристика процесса.

Методология проведения нейтронно-шумовых измерений с использованием ДПЗ предполагает точечную оценку изменения нейтронного потока, т.е. локальный результат. Поэтому существенен разброс в спектральных характеристиках не только между разными ТВС по АЗ, но и ДПЗ, расположенными на разных горизонтах в пределах одной ТВС. Положение усугубляется тем, что величина флуктуаций обычно не превышает $1 \cdot 10^{-9}$ А, а это вносит дополнительные помехи в измерительный тракт. Все сказанное хорошо известно, поэтому целесообразно рассматривать не АСПМ, а различные парные характеристики, одной из которых является функция когерентности.

Функция когерентности характеризует степень линейной зависимости между сигналами в частотной области, является безразмерной величиной и принимает значение 1, если два процесса на фиксированной частоте связаны линейно, в случае если функция когерентности равно 0, то процессы на этой частоте не связаны (более подробно [10,28]).

Исходя из рисунков 5 и 6 легко заметить, что в составеборок каналов нейтронных измерений (КНИ) могут присутствовать неисправные ДПЗ (рис. 6а и рис. 6в). Такие сигналы необходимо тщательно отфильтровывать и не учитывать при анализе. Собственно анализ по спектральным оценкам требует определенного опыта. Так, например, пики, имеющие острую форму и, условно, «узкие» в основании (лежат на ограниченном количестве точек) имеют механическую природу. Классический пример – это колебания ОР СУЗ на частотах в интервале 105 Гц – 111 Гц (рис. 6б, $f = 106,4$ Гц, рис. 7б, $f = 107,1$ Гц и $f = 110,9$ Гц). Пики имеющие «плавные» вершины и «широкое» основание, как правило, связаны с гидродинамическими процессами, такими как акустические стоячие волны (подробнее [1,27]), турбулизация потока, кипение и т.д. В качестве примера, следует привести резонанс на рисунке 6в в границах $\sim f = 72,4 \div 78,6$ Гц.

При более детальном рассмотрении данных, представленных в источнике [17], можно с определенной степенью уверенности говорить о нерациональном подходе к обработке информации. Так исходя из таблицы 3, частота колебаний пучка твэл может варьироваться в пределах сотен герц, что на прак-

тике означает изменение жесткости или податливости конструкции в широчайших пределах, что невозможно. Скорее всего, то, что в источнике [11] постулируется как собственные колебания конструктивных элементов, являются результатом взаимодействия движущейся среды на твэл, т.е. вынужденные колебания. Простейшая модель такого взаимодействия это хаотичное воздействие на твэлы (в нашем случае) локальных турбулентностей, кавитационных пузырьков, пузырьков пара и других неравномерностей потока. Но так как такие процессы имеют случайный характер, и частота воздействия на конструктивные элементы носит также случайный характер, то при спектральном представлении будет выделяться некая частотная область с относительно равным заполнением, т.е. ровно то, что можно видеть в табл. 3. Не смотря большое количество теоритических и экспериментальных работ [29–31] в области расчетов и моделирования взаимодействия движущегося потока и пучка стержневых элементов (модель ТВС), имеется множество невыясненных до конца проблем. В том числе и с частотным откликом такой системы на различные гидродинамические возмущения.

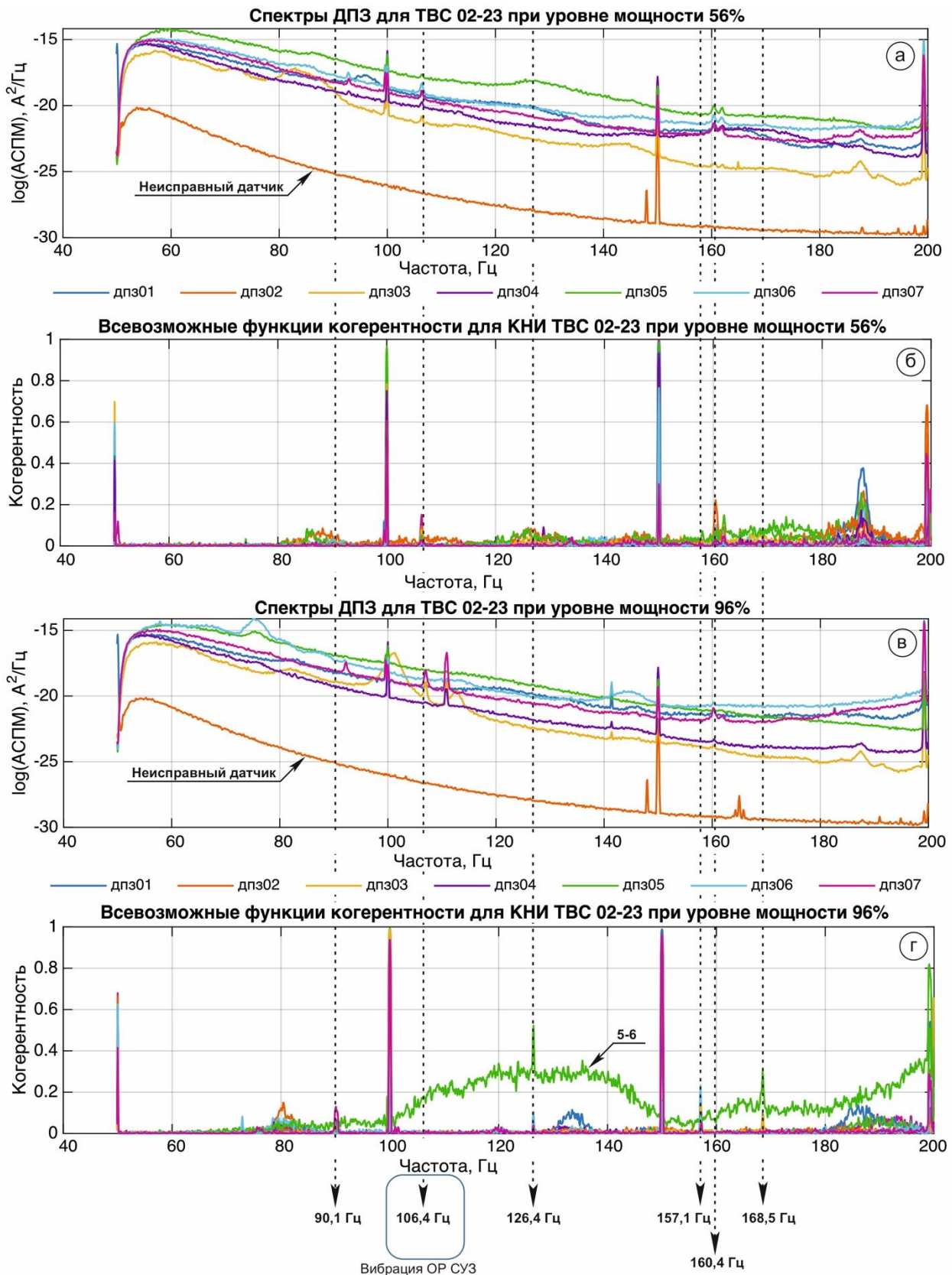


Рисунок 6. Автоспектральная плотность мощности ДПЗ для ТВС 02-23 при уровне мощности 56% (а) и 96% (в). Значение функции когерентности всевозможных комбинаций ДПЗ для ТВС 02-23 при уровне мощности 56% (б) и 96% (г)

Figure 6. Autospectral power density of the direct charge sensors on fuel assemblies 02-23 at a power level of 56% (a) and 96% (c). The value of the coherence function of various combinations of the direct charge sensors on fuel assemblies 02-23 at a power level of 56% (b) and 96% (d)

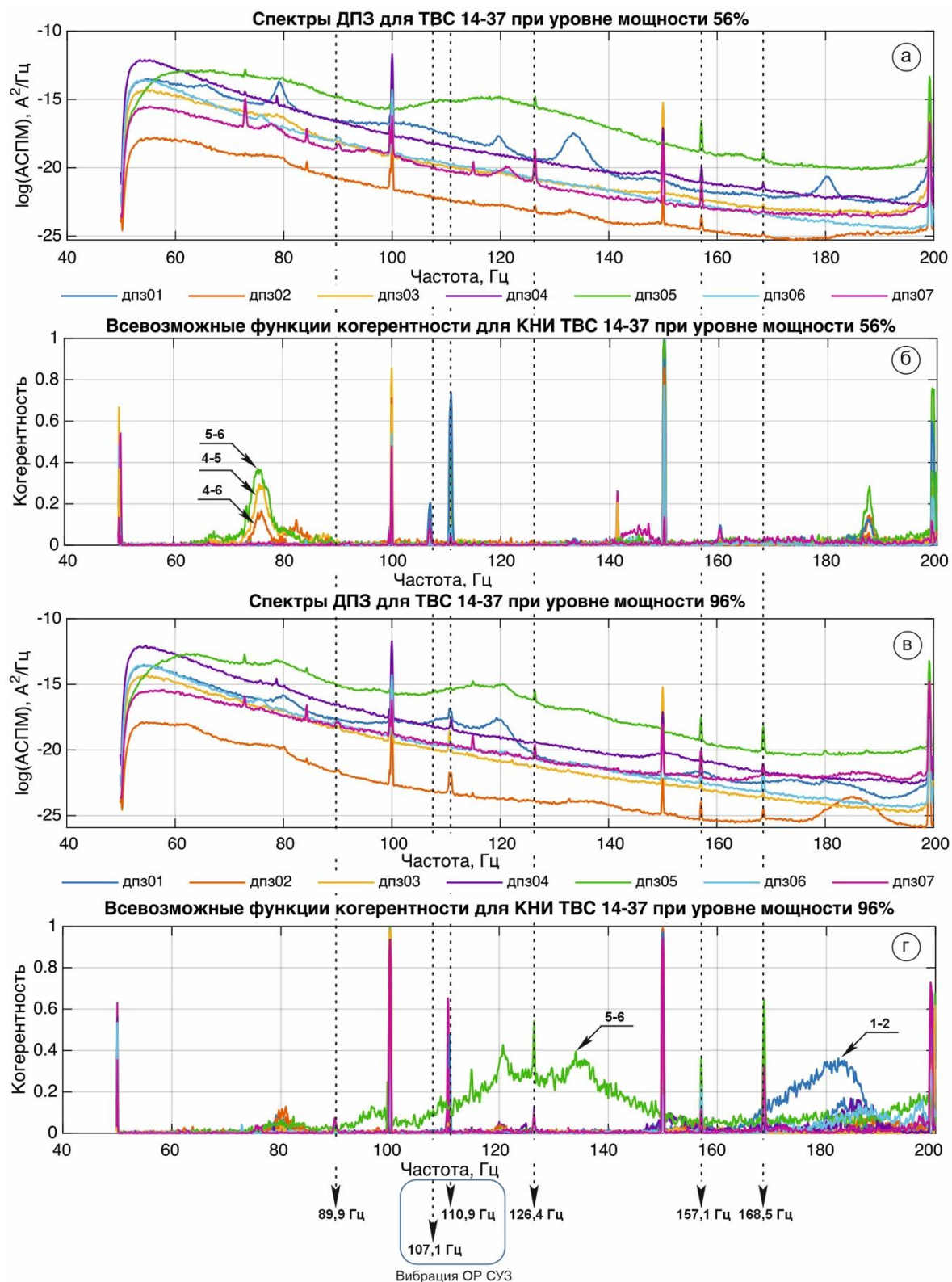


Рисунок 7. Автоспектральная плотность мощности ДПЗ для ТВС 14-37 при уровне мощности 56% (а) и 96% (в). Значение функции когерентности всевозможных комбинаций ДПЗ для ТВС 14-37 при уровне мощности 56% (б) и 96% (г)

Figure 7. Autospectral power density of the direct charge sensors on fuel assemblies 14-37 at a power level of 56% (a) and 96% (c). The value of the coherence function of various combinations of the direct charge sensors on fuel assemblies 14-37 at a power level of 56% (b) and 96% (d)

Сказанное выше хорошо иллюстрируют рисунки 6г и 7г, где функция когерентности между ДПЗ 5 и 6 имеет равномерное заполнение между частотами 90 Гц и 160 Гц (помечена 5-6), но только на мощности 96%. При уровне 56% указанный эффект отсутствует. Данный факт следует рассматривать как резкое изменение состава потока, т.е. появление паровой фракции. Когда теплоноситель однороден – между горизонтами 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, функция когерентности примерно равно нулю. При появлении пузырьков пара, происходит мгновенное изменение реактивности (увеличение пара приводит к уменьшению воды, т.е. уменьшению плотности замедлителя), регистрируемое двумя ближайшими датчиками, т.е. ДПЗ5 и ДПЗ6. Поэтому значение функции когерентности принимают значения отличные от нуля. Ввиду того, что указанный процесс хаотичен, то частота образования паровых пузырей носит случайный характер, что и сказывается на спектре – появляется область, перекрывающая определенный диапазон частот. В данном случае, можно с некоторым упрощением считать, что функция когерентности описывает частоту образования пузырьков пара. Когда процесс кипения не развит и возникают отдельные пузырьки, то в спектре выделяется одна частота (малый разброс по частоте). В случае развития кипения, образование пузырьков происходит с разными частотами, что приводит к «размытию» резонанса (рис. 6г и рис. 7г.). На рисунке 7б можно заметить резонанс с признаками кипения в самой начальной стадии (отмечен 5-6, 4-5, 4-6). При мощности РУ в 56% образование пузырьков пара единично (частота $f \sim 77$ Гц), но затрагивает уже два горизонта ДПЗ 4-5 и 5-6. Причем данный процесс регистрируется только в ТВС с координатами 14-37. Для ТВС 02-29 кипение при мощности 56% отсутствует (рис. 6б). На рисунке 7г выделяется и другая особенность – размытие функции когерентности на частоте $f \sim 180$ Гц между горизонтами 1-2. Кипением данную аномалию объяснить нельзя, т.к. теплоноситель не нагрет. По всей видимости, это как раз гидродинамическое взаимодействие между потоком теплоносителя и самой конструкцией ТВС, которое и было

обнаружено на испытательном стенде в АО ОКБ «Гидропресс» (табл. 3 – Колебания пролета между ДС-2 и ДС-3, рис. 3). Отсутствие описанного эффекта для ТВС 02-29 (рис. 6г) объясняется скорее всего выходом из строя ДПЗ2, что не позволяет рассчитать функцию когерентности между горизонтами 1 и 2 соответствующей сборки. Безусловно, предложенная модель весьма приближительна и носит чисто описательный характер, но она позволяет понять процесс и сделать три важных вывода:

- подкипание теплоносителя в ВВЭР-1200 имеет место при нормальной эксплуатации между горизонтами 5 и 6 ДПЗ;
- между горизонтами 6 и 7 кипение отсутствует, что, скорее всего, связано со схлопыванием пузырьков пара и переходом теплоносителя к однофазному состоянию;
- участок с максимальной температурой ТВС находится между горизонтами 5 и 6 ДПЗ, а не в районе ДПЗ7, где устанавливаются термопары для контроля энергонапряженности ТВС.

«Узкие» резонансы на частотах $f \sim 90$ Гц, $f = 126,4$, $f \sim 160 \div 170$ Гц (рис. 6г и рис. 7г), скорее всего, соответствуют колебаниям всего пучка ТВЭЛ и колебаниям секций ТВЭЛ между дистанционирующими решетками. Однако авторы оставляют данное утверждение пока под вопросом, т.к. требуются дополнительные исследования экспериментальных данных, полученных как при динамических режимах, так и при длительной стационарной работе энергоблоков.

Необходимость проведения дальнейших нейтронно-шумовых исследований определяется, прежде всего, испытанием на НВАЭС нового вида топлива (ТВС-5), которое имеет другое, по сравнению с ТВС-2006, конструктивное исполнение, в частности отсутствие шлинтования ТВЭЛ (для облегчения автоматической сборки/разборки ТВС). По мнению авторов, данное новшество возможно приведет как изменению частотного состава колебаний ТВЭЛ, так и к увеличению их амплитудных значений. Другими, отличными от нейтронно-шумовых методов, выявить указанные изменения в процессе работы блока на мощности невозможно.

Выводы

1. В представленной работе впервые обоснована и экспериментально доказана возможность использования высокочастотной составляющей сигналов (более 50 Гц) датчиков прямого заряда для оценки состояния АЗ.

2. Выделен частотный диапазон (105 Гц – 111 Гц), соответствующий колебаниям ОР СУЗ в АЗ и экспериментально обоснована зависимость изменения частоты колебаний от положения ОР СУЗ, что позволяет создать независимый канал контроля поло-

жения ОР на альтернативных физических принципах.

3. Экспериментально обосновано наличие подкипания теплоносителя между горизонтами 5 и 6 ДПЗ при уровне мощности, соответствующему номинальному значению.

4. Выявлены возможные собственные частоты колебаний как всего пучка ТВЭЛ, так и его отдельных секций.

5. Обоснована необходимость дальнейших нейтронно-шумовых исследований на НВАЭС, в связи с использованием нового типа топлива ТВС-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Могильнер А.И., Фокин Г.Н., Чайка Ю.В., Кузнецов Ф.М. Применение малых ЭВМ для измерения реактивности. *Атомная энергия*. 1974;36(5):358–362. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t36-5_1974/p358/ (дата обращения 26.04.2025).

Mogilner A.I., Fokin G.N., Chaika Yu.V., Kuznetsov F.M. The use of small computers for measuring reactivity. *Nuclear energy*. 1974;36(5):358–362. (In Russ.). Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t36-5_1974/p358/ (accessed: 26.04.2025).

2. Скоморохов А.О., Слепов М.Т. Контроль достоверности информации в системе вибродиагностики Нововоронежской АЭС. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 1999;1:56–63. Режим доступа: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/1999/01.pdf> (дата обращения 26.04.2025).

Skomorokhov A.O., Slepov M.T. Verification of information reliability in the vibrodiagnostics system of the Novovoronezh NPP. *Izvestiya Vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*. 1999;1:56–63. (In Russ.). Available at: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/1999/01.pdf> (accessed: 26.04.2025).

3. Bulavin V.V., Gutsev D.F., Pavelko V.I. The experimental definition of the acoustic standing waves series shapes, formed in the coolant of the primary circuit of VVER-440 type reactor. *Progress in nuclear energy*. 1995;29(3/4):153–170. [https://doi.org/10.1016/0149-1970\(95\)00005-5](https://doi.org/10.1016/0149-1970(95)00005-5)

4. Булавин В.В., Гутцев Д.Ф., Павелко В.И. Исследования характеристик вибродиагностики ВВЭР-1000 в эксплуатационных. *Атомная энергия*. 1995;79(5):343–349. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4797> (дата обращения 26.04.2025).

Bulavin V.V., Gutsev D.F., Pavelko V.I. Research of VVER-1000 vibration diagnostics characteristics in operating conditions. *Atomic energy*. 1995;79(5):343–349. (In Russ.). Available at: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4797> (accessed: 26.04.2025).

5. Katona T., Mesko L., Por G., Valko J. Problems of estimation of the thermohydraulic parameters using neutron and temperature noise signals in PWR's. *Progress in nuclear energy*. 1985;15:359–364. [https://doi.org/10.1016/0149-1970\(88\)90061-3](https://doi.org/10.1016/0149-1970(88)90061-3)

6. Katona T., Mesko L. Investigation of the noise source characteristics. *Progress in nuclear energy*. 1985;15: 685–698. [https://doi.org/10.1016/0149-1970\(85\)90097-6](https://doi.org/10.1016/0149-1970(85)90097-6)

7. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Виброакустика в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200: Монография. Москва: Наука, 2018. 472 с. ISBN 978-5-02-040138-9. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/arkadov_vibroakustika_2018/p2/ (дата обращения 26.04.2025).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Vibroacoustics in applications to the VVER-1200 reactor unit: Monograph. Moscow: Nauka, 2018. 469 p. ISBN 978-5-02-040138-9. (In Russ.). Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/arkadov_vibroakustika_2018/p0/ (accessed: 26.04.2025).

8. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Шумовой мониторинг в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200: Монография. Москва: Наука, 2021. Ч.1. 222 с. ISBN 978-5-02-040869-2 Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=okrpeg&ysclid=mfmah2t689587940434> (дата обращения 26.04.2025).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Noise monitoring in applications to the VVER-1200 reactor unit: Monograph. (Library of technical diagnostics of nuclear power plants). Moscow: Nauka, 2021. Part 1. 216 p. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=okrpeg&ysclid=mfmah2t689587940434> (accessed: 26.04.2025).

9. 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 вузов. Ядерная энергетика*. 2016;4:44–54. <https://doi.org/10.26583/npe.2016.4.05>

Pavelko V.I., Slepov M.T., Khairatdinov V.U. Experience of conducting complex measurements using heterogeneous systems at various stages of starting up the VVER-1200 power unit. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2016;4:44–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2016.4.05>

10. Слепов М.Т. Методология комплексного шумового контроля оборудования ВВЭР-1200: Диссертация доктора технических наук по специальности 2.4.9. Москва, 2025. 307 с. Режим доступа: <https://cat.gpntb.ru/index.php?id=EC/ShowFull&bid=d85d6ba3b1cdeda6ed461dfbbff281ee&irbDb=ESVODT> (дата обращения 26.04.2025).

Slepov M.T. Methodology of comprehensive noise control of VVER-1200 equipment: Doctor of technical sciences dissertation speciality 2.4.9. Moscow, 2025. 307 p. (In Russ.). Available at: <https://cat.gpntb.ru/index.php?id=EC/ShowFull&bid=d85d6ba3b1cdeda6ed461dfbbff281ee&irbDb=ESVODT> (accessed: 26.04.2025).

11. Поваров В.П., Украинцев В.Ф., Голубев Е.И., Жук М.М. Экспериментальные исследования нейтронно-физических процессов в активной зоне ВВЭР-1200. Нововоронеж: ООО РПГ «Девятое облако», 2021. 264 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46457259&ysclid=mfmauqzvta741071478> (дата обращения 26.04.2025).

Povarov V.P., Ukraintsev V.F., Golubev E.I., Zhuk M.M. Experimental research of neutron-physical processes in the VVER-1200 core. Novovoronezh: LLC RPG «Ninth Cloud», 2021. 264 p. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46457259&ysclid=mfmauqzvta741071478> (accessed: 26.04.2025).

12. Сборка тепловыделяющая ядерного реактора: Пояснительная записка 2006.В.132.&0UJA&&.JKA&&.021CA.0006 392М.06.16.01 ПЗ. Подольск: АО ОКБ «Гидропресс», 2009. 102 с. Режим доступа: внутренний документ организации (доступ по запросу).

Assembly of a nuclear reactor heat-generating assembly: Explanatory note 2006.V.132.&0UJA&&.JKA&&.021CA.0006 392М.06.16.01 PZ. Podolsk: JSC OKB Gidropress, 2009. 102 p. (In Russ.). Available at: internal document of the organization (access upon request).

13. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Поваров В.П., Слепов М.Т. Практические возможности и перспективы развития нейтронно-шумовой диагностики активных зон ВВЭР. *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-реакторные константы»*. 2022;1:74–82. Режим доступа: <https://vant.ippe.ru/year2022/1/radiation-technologies/2117-7.html> (дата обращения 26.04.2025).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Povarov V.P., Slepov M.T. Practical possibilities and prospects for the development of neutron-noise diagnostics of VVER active zones. *Issues of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Reactor Constants»*. 2022;1:74–82. (In Russ.). Available at: <https://vant.ippe.ru/year2022/1/radiation-technologies/2117-7.html> (accessed: 26.04.2025).

14. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Вибросостояние корпуса и внутрикорпусных устройств реакторной установки ВВЭР-1200. *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2022;1(136):54–67. https://doi.org/10.46960/1816-210X_2022_1_547

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Vibration condition of the vessel and in-vessel devices of the VVER-1200 reactor unit. *Proceedings of NSTU named after P.E. Alekseev*. 2022;1(136):54–67. (In Russ.). https://doi.org/10.46960/1816-210X_2022_1_547

15. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Усанов А.И. Виброшумовая диагностика ВВЭР. Москва: Энергоатомиздат, 2004. 344 с. Режим доступа: <https://diaprom.ru/publication/?id=7> (дата обращения 26.04.2025).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Usanov A.I. VVER Vibronoise diagnostics. Moscow: Energoatomizdat, 2004. 344 p. (In Russ.). Available at: <https://diaprom.ru/publication/?id=7> (accessed: 26.04.2025).

16. Драгунов Ю.Г., Солонин В.И., Перевезенцев В.В. Экспериментальные исследования динамических характеристик пучков твэлов ТВС ВВЭР в турбулентном потоке теплоносителя. *Атомная энергия*. 2012;113(4): 237–240. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t113-4_2012/p237/ (дата обращения 26.04.2025).

Dragunov Yu.G., Solonin V.I., Perevezentsev V.V. Experimental studies of dynamic characteristics of fuel element bundles of VVER fuel assemblies in a turbulent flow of a heat carrier. *Nuclear energy*. 2012;113(4): 237–240. (In Russ.). Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t113-4_2012/p237/ (accessed: 26.04.2025).

17. Отчет о научно-исследовательской работе «Вибрационные испытания макета №2 ТВС-5» 545-О-004. Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2022. 34 с. Режим доступа: внутренний документ организации (доступ по запросу).

Research Report «Vibration tests of model No.2 TVS-5» 545-O-004 Podolsk: OKB «Gidropress», 2022. 34 p. (In Russ.). Available at: internal document of the organization (access upon request).

18. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2011. 768 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004829046?ysclid=mfmbbcszg2z945862045> (дата обращения 26.04.2025).

Sergienko A.B. Digital signal processing. Saint-Petersburg: BHV-Petersburg, 2011. 768 p.: ill. (Educational literature for universities). (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004829046?ysclid=mfmbbcszg2z945862045> (accessed: 26.04.2025).

19. Аркадов Г.В., Слепов М.Т. Нейтронно-шумовые методы контроля активных зон ВВЭР. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(4):55–70. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-06>

Arkadov G.V., Slepov M.T. Neutron-noise methods of monitoring VVER active zones. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):55–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-06>

20. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Анализ «быстрых» шумовых измерений динамических процессов ВВЭР. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2023;4:19–36, <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.02>

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Analysis of «fast» noise measurements of VVER dynamic processes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*. 2023;4:19–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.02>

21. 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. Алексеева*. 2023;4(143):51–61. doi: [10.46960/1816-210X_2023_4_51](https://doi.org/10.46960/1816-210X_2023_4_51)

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Analysis of the noise component of direct charge sensor signals in VVER manoeuvring modes. *Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev*. 2023;4(143):51–61. (In Russ.). doi: [10.46960/1816-210X_2023_4_51](https://doi.org/10.46960/1816-210X_2023_4_51)

22. 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. Режим доступа: <https://openrepository.mephi.ru/entities/publication/24945c8f-a0a0-440b-a4ac-14b97d9b2d59> (дата обращения 26.04.2025).

Povarov V.P., Golubev E.I., Zhuk M.M. Physics of the VVER-1200 reactor and operational issues: Scientific and practical guide. Novovoronezh Nuclear Power Plant Branch of Rosenergoatom Concern, 2025; Belgorod: Konstanta, 2025. 332 p. (In Russ.). Available at: <https://openrepository.mephi.ru/entities/publication/24945c8f-a0a0-440b-a4ac-14b97d9b2d59> (accessed: 26.04.2025).

23. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. Москва: Наука, 1966. 247 с. Режим доступа: <https://spbib.ru/ru/catalog/-/books/10582435-spravochnik-po-elementarnoy-fizike?ysclid=mfmubuhsu083817273> (дата обращения 26.04.2025).

Koshkin, N.I., Shirkevich, M.G. Handbook of elementary physics. Moscow: Nauka, 1966. 247 p. (In Russ.). Available at: <https://spbib.ru/ru/catalog/-/books/10582435-spravochnik-po-elementarnoy-fizike?ysclid=mfmubuhsu083817273> (accessed: 26.04.2025).

24. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: в 2-х томах. Москва: Мир, 1983. Т.1. 311 с. Т.2. 256 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/K3IC6BeOTm01w>, <https://djvu.online/file/IMvGuF5s3NoYZ> (дата обращения 26.04.2025).

Max J. Methods and Techniques of Signal Processing in Physical Measurements: in 2 volumes. – Moscow: Mir, 1983. Vol. 1. 311 p. Vol. 2. 256 p. (In Russ.). Available at: <https://djvu.online/file/K3IC6BeOTm01w>, <https://djvu.online/file/IMvGuF5s3NoYZ> (accessed: 26.04.2025).

25. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. Москва: Техносфера, 2006. 856 с. ISBN 5-94836-077-6. Режим доступа: <https://djvu.online/file/RcExf7aDfNjrB> (дата обращения 26.04.2025).

Oppenheim A., Shafer R. Digital Signal Processing. Moscow: Tekhnosfera, 2006. 856 p. ISBN 5-94836-077-6. (In Russ.). Available at: <https://djvu.online/file/RcExf7aDfNjrB> (accessed: 26.04.2025).

26. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов: 2 издание. Москва: ООО «Бином-Пресс», 2006 г. 656 с., ISBN 5-9518-0149-4. Режим доступа: <https://djvu.online/file/DW2v6v0QAUXzZ> (дата обращения 26.04.2025).

Lyons R. Digital Signal Processing: 2nd Edition. Moscow: Binom-Press LLC, 2006. 656 p., ISBN 5-9518-0149-4. (In Russ.). Available at: <https://djvu.online/file/DW2v6v0QAUXzZ> (accessed: 26.04.2025).

27. Аркадов Г.В., Слепов М.Т. Поле акустических стоячих волн в контурах циркуляции ВВЭР. *Теплоэнергетика*. 2025;4:51–63. <https://doi.org/10.56304/S0040363625700778>

Arkadov G.V., Slepov M.T. The field of acoustic standing waves in VVER circulation loops. *Thermal power engineering*. 2025;4:51–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.56304/S0040363625700778>

28. Рэндалл Р.Б. Частотный анализ. Перевод с английского. Дания, Брюль и Кьер, Москва: Мир, 1989. 389 с. Режим доступа: <https://z-lib.fm/book/2964471/2d2957/%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9-%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7.html> (дата обращения 26.04.2025).

Randall R.B. Frequency Analysis. Translated from English. Denmark, Brüel and Kjær, Moscow: Mir, 1989. 389 p. (In Russ.). Available at: <https://z-lib.fm/book/2964471/2d2957/%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9-%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7.html> (accessed: 26.04.2025).

29. Перевезенцев В.В., Солонин В.И., Сорокин Ф.Д. Нестационарные гидродинамические нагрузки и вибрации пучка твэлов в ТВС ВВЭР-440. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2008;4:23–29. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11701040&ysclid=mfm79croh89749197> (дата обращения 26.04.2025).

Perevezentsev V.V., Solonin V.I., Sorokin F.D. Non-stationary hydrodynamic loads and vibrations of a bundle of fuel elements in a VVER-440 reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2008;4:23–29. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11701040&ysclid=mfm79croh89749197> (accessed: 26.04.2025).

30. Крапивцев В.Г., Марков П.В., Солонин В.И. Течение и теплоперенос в пучках стержневых твэлов водоохлаждаемых реакторов с модифицированными сотовыми дистанционирующими решетками. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2015;3:97–105. <https://doi.org/10.26583/npe.2015.3.10>

Krapivtsev V.G., Markov P.V., Solonin V.I. Flow and Heat Transfer in Bundles of Rod Fuel Elements of Water-Cooled Reactors with Modified Honeycomb Spacers. *Izvestiya Vuzov. Yadernaya Energetika*. 2015;3:97–105. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2015.3.10>

31. Перевезенцев В.В. Случайные гидродинамические нагрузки и вибрации твэлов в турбулентном потоке теплоносителя в ТВС ВВЭР. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2012;2:102–111. Режим доступа: <https://nuclear-power-engineering.ru/article/2012/02/13/?ysclid=mfm9uzwc586702360> (дата обращения 26.04.2025).

Perevezentsev V.V. Random hydrodynamic loads and vibrations of fuel elements in a turbulent coolant flow in a VVER fuel assembly. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2012;2:102–111. (In Russ.). Available at: <https://nuclear-power-engineering.ru/article/2012/02/13/?ysclid=mfm9uzwc586702360> (accessed: 26.04.2025).

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.

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.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

FUNDING:

The work is carried out without using external sources of financing.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

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, Воронежской области, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0001-5563-0526> e-mail: tymofeech@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Gennady V. Arkadov – Cand. Sci. (Engin), Director General, «Rise» non-profit partnership for system engineering development support, 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 28.05.2025

После доработки / Revision 09.08.2025

Принята к публикации / Accepted 14.08.2025

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ OPERATION OF FACILITIES NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-07>

EDN VWHSHX

Оригинальная статья / Original paper



Обзор нейтронно-физических результатов радиального профилирования на примере элементарной ячейки реактора типа ВВЭР-1200

М.А. Попов , Р.А. Внуков , В.В. Колесов 

Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация

✉ maksim.popovf@yandex.ru

Аннотация. Для увеличения длительности эксплуатации твэлов в ядерном реакторе необходимо создать запас предельного срока службы топливных и конструкционных материалов. В данной работе на примере элементарной ячейки реактора ВВЭР-1200 в бесконечной размножающей среде рассмотрены различные способы снижения радиальной неравномерности выгорания твэлов путем перераспределения делящихся ядер (профилирования): для проведения профилирования топливная таблетка разбивалась на различное количество концентрических слоев, обогащения которых варьировались при сохранении суммарного числа делящихся ядер в топливной таблетке на начало топливной кампании. В ПК Serpent 2 выполнены нейтронно-физические расчеты соответствующих моделей, после чего было проведено сравнение полученных для них характеристик: коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде, среднего темпа потери реактивности, доли запаздывающих нейтронов на начало кампании, радиальных распределений выгораний и энерговыделений (в различные моменты времени), изменения эффектов реактивности после профилирования. Результатом данной работы является подобранный оптимальный метод снижения выгорания на периферии топливной таблетки за счет повышения обогащения в центральной части топливной таблетки и, как следствие, более равномерный профиль выгорания в целом по таблетке. Показано, что в результате проведенных преобразований не происходит изменения нейтронно-физических характеристик. Возможная проблема при использовании указанного метода профилирования может состоять в возрастании температуры периферийного слоя в результате значительного возрастания энерговыделения в нем с течением топливной кампании.

Ключевые слова: радиальное профилирование, оптимизация, ВВЭР-1200, твэл, топливная таблетка, выгорание, неравномерность, продление кампании, обогащение.

Для цитирования: Попов М.А., Внуков Р.А., Колесов В.В. Обзор нейтронно-физических результатов радиального профилирования на примере элементарной ячейки реактора типа ВВЭР-1200. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(3):77–92. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-07>

For citation: Popov M.A., Vnukov R.A., Kolesov V.V. Review of the neutron physics results of radial profiling using the example of a VVER-1200 reactor unit cell. *Nuclear Safety*. 2025;15(3):77–92. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-07>

Review of the neutron physics results of radial profiling using the example of a VVER-1200 reactor unit cell

Maksim A. Popov , Ruslan A. Vnukov , Valeriy V. Kolesov 

Obninsk Institute of Atomic Energy the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Obninsk, Kaluga region, Russian Federation

✉ maksim.popovf@yandex.ru

Abstract. It is necessary to create a reserve of the maximum service life of fuel and structural materials to increase the service life of fuel rods in a nuclear reactor. This paper considers various methods of reducing the radial unevenness of fuel element burnup by redistributing fissionable nuclei (profiling) using the example of the unit cell of the VVER-1200 reactor in the infinite breeding medium. The fuel pellet is divided into a different number of concentric layers to be profiled, the enrichment of the layers varies while maintaining the total number of fissile nuclei in the fuel pellet at the

beginning of the fuel campaign. In the Serpent 2 PC, neutron physics calculations of the corresponding models are performed, after that the characteristics obtained for them are compared: the infinite multiplication factor, the average rate of reactivity loss, the proportion of delayed neutrons at the beginning of the campaign, radial burnup profile and energy release distributions (at different time points), and changes in reactivity effects after profiling. The result of this work is a selected optimal method to reduce burnup on the fuel pellet periphery by increasing enrichment in the central part of the fuel pellet and, as a result, a more uniform burnup profile in the whole of the tablet. The research shows that there is no change in the neutron-physical characteristics as a result of the transformations carried out. A possible problem when using this profiling method may be an increase in the peripheral layer temperature as a result of a significant increase in energy release in it during the fuel campaign.

Keywords: radial profiling, optimization, VVER-1200, fuel element, fuel pellet, burnout, unevenness, prolongation of the campaign, enrichment.

Введение

Один из путей улучшения технико-экономических показателей реакторных установок – увеличение степени выгорания топлива. На текущий момент данная задача в основном решается за счет повышения обогащения топлива по делящимся изотопам и его более длительной выдержки в активной зоне, либо за счет использования выгорающих поглотителей [1].

Поскольку доступные запасы урана потенциально являются ограниченными, имеет смысл искать пути увеличения длительности топливной кампании при тех же теплотехнических запасах [2]. Например, каким-либо образом перераспределять делящиеся ядра по объему топливного сердечника из каких-либо соображений с целью их более эффективного использования в ядерном реакторе (далее в данной работе такое перераспределение будем называть профилированием).

Подходы к профилированию топлива могут быть различны. К примеру, оно может производиться «по потоку» или «по выгоранию», то есть исходя из неравномерностей распределения по топливному стержню потока нейтронов или выгорания [3]. Определять требуемый подход следует исходя из тех целей, которые требуется достичь.

Предел выгорания топлива в ядерном реакторе достигается, когда безопасная работа реактора больше не может быть гарантирована, а также когда эффективное производство тепла больше не может поддерживаться. Так, с увеличением длительности выдержки топлива в ядерном реакторе вследствие различных факторов происходит его набухание, в результате чего увеличивается пористость топливных таблеток, газо-

образные продукты деления выходят в газовый зазор, в результате чего снижается теплопроводность непосредственно топлива и газового зазора [1,4–5].

Особенно заметно происходит набухание топлива в периферийном слое топливного сердечника. В результате высокого потока быстрых нейтронов на периферии значительно чаще протекает реакция резонансного захвата $^{238}_{92}\text{U}(n, \gamma)^{239}_{92}\text{U}$, и, как следствие, образуется значительно больше ^{239}Pu (по сравнению с центральным слоем), который, как и ^{235}U , является делящимся изотопом. В результате, например, в топливных таблетках из диоксида урана в тепловых реакторах при среднем выгорании по таблетке порядка 40 МВт·сут/кг при движении к периферии происходит экспоненциальный рост выгорания, причем на периферии оно отличается от среднего значения примерно в 2,5 раза [1,6].

Кроме набухания топливных таблеток и снижения теплофизических характеристик, высокое выгорание на периферии топливного сердечника приводит к усиленному коррозионному воздействию на оболочку ТВЭЛ [7], в результате чего в том числе ускоряется ее гидрирование. Описанные воздействия приводят к ухудшению механических свойств оболочки (в частности, к ее охрупчиванию).

Для борьбы с избыточным выгоранием на периферии в основном предлагают использовать радиальное профилирование ТВЭЛов по выгоранию: предполагается создание топливной таблетки, разбитой на несколько концентрических слоев, обогащение в которых снижается по мере удаления от центра, совместно с добавлением в периферийный слой выгорающего поглотителя [8] или без

него [1,4]. Хотя в данных работах говорится о снижении выгорания на периферии, при этом не исследовано влияние профилирования на температуру топлива, а также на изменение коэффициента размножения нейтронов (за счет чего также может быть достигнуто изменение длины топливной кампании).

Практически процедура радиального профилирования представляет собой один из вариантов нанесения пленочных покрытий. Тонкопленочные оксидные покрытия нашли свое применение в области микроэлектроники и оптики [9]. В ядерной технике имеется ряд патентов, посвященных созданию покрытий, прежде всего, поглотителей, на слое топлива [10–12]. Описываемые процедуры связаны с нанесением на цилиндрическую форму покрытия из поглотителя, и их распространение в перспективе может привести к частичному изменению конструкции существующих твэгов [10]. Кроме того, известно применение ПИУ-покрытия с двумя пироуглеродными слоями и разработки более сложных четырехслойных ПИУК-покрытий для уменьшения диффузии и миграции топлива при высоких температурах в реакторах с микротвэлами [13].

На текущий момент в промышленности, в том числе и в ядерной энергетике, для получения покрытий из тугоплавких соединений (оксидов, карбидов, нитридов и т. д.) в основном используется процесс газофазного

осаждения: при осаждении тугоплавких соединений нашли применение парогазовые смеси галогенидов металлов и соединений, являющихся поставщиком второго компонента, а также газа-транспортера. Данный способ, в том числе, принимается во внимание при разработке новых перспективных видов ядерного топлива, поскольку активно исследуются возможности использования более теплопроводных материалов, чем диоксид урана [14]. С учетом накопленного опыта изготовления топлива (сферической, цилиндрической и иной [11] формы) профилирование путем нанесения на поверхности топливных таблеток оксидных порошков урана представляется практически осуществимым.

В данной работе на примере элементарной ячейки реактора ВВЭР-1200 рассматривается возможный способ снижения выгорания топлива на периферии твэла с целью увеличения длительности топливной кампании.

Расчетная модель

Для решения поставленной задачи в программном комплексе Serpent 2 [15] была смоделирована элементарная ячейка реактора ВВЭР-1200 [16] в бесконечной размножающей среде (с заданием граничных условий на отражение вылетающих нейтронов) в нескольких вариациях (см. рисунок 1):

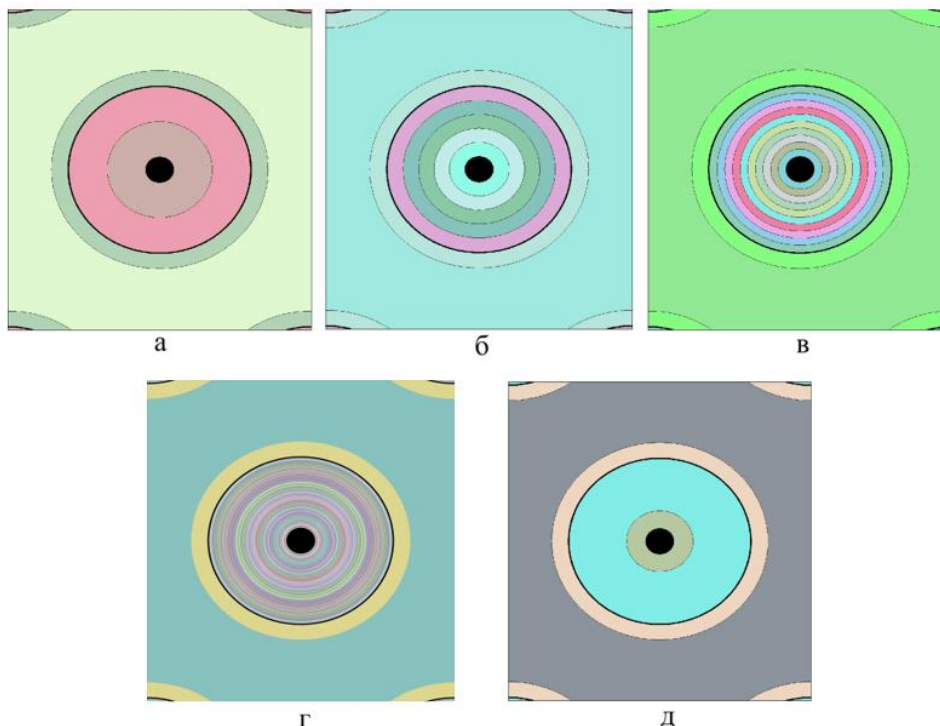


Рисунок 1. Поперечные срезы твэлов из различных моделей: а – модель 2 (2 слоя); б – модель 2 (5 слоев); в – модель 2 (10 слоев); г – модель 2 (200 слоев); д – модель 3 (2 слоя)

Figure 1. Cross sections of fuel rods from various models: а – model 2 (2 layers); б – model 2 (5 layers); в – model 2 (10 layers); г – model 2 (200 layers); д – model 3 (2 layers)

Ниже приведено описание моделей, использующихся для расчетов в данной работе:

1. Нет разбиения топливной таблетки на слои, равномерное обогащение топлива, составляющее 4.95% (далее – базовая модель).

2. Разбиение топливной таблетки на 2, 5, 10 и 200 концентрических слоев одинаковой толщины, изначально имеющих равномерное обогащение 4.95% (далее – модель 2).

После получения радиального профиля выгорания в модели 2 производилось профилирование: по полученным значениям выгорания в каждом i -м слое производился расчет поправочных коэффициентов к обогащению в данном слое на $(j + 1)$ -й итерации:

$$a_i^j = \frac{\langle b^j \rangle}{b_i^j}, \quad (1)$$

где b_i^j – выгорание в i -м слое на j -й итерации, $\langle b^j \rangle$ – среднее выгорание по радиусу топливной таблетки на j -й итерации.

Далее рассчитывалось обогащение в каждом i -м слое на $(j + 1)$ -й итерации:

$$x_i^{j+1} = a_i^j \cdot x_i^j, \quad (2)$$

В результате данной манипуляции суммарное число делящихся ядер (предполагалось, что на начальный момент времени из делящихся ядер имеется только ^{235}U) в топливной таблетке может измениться. Для того чтобы этого не происходило, также рассчитывались поправочные коэффициенты, на которые умножалось обогащение, рассчитанное по формуле (2):

$$k^j = \frac{N_0}{N_j}, \quad (3)$$

где N_0 – число делящихся ядер в топливной таблетке до профилирования,

N_j – получившееся после умножения обогащений на коэффициенты a_i^j число делящихся ядер.

Итерационный процесс профилирования производился до тех пор, пока не было выполнено условие остановки: изменение всех отслеживаемых параметров между j -й и $(j + 1)$ -й итерацией должно быть меньше 3σ по данному параметру.

3. Топливная таблетка разбивалась на 2 концентрических слоя, размеры которых и

обогащение топлива, в которых варьировались. Радиус границы между слоями варьировался от 0.087 см до 0.353 см с шагом 0.027 см, обогащение в ближнем к центру таблетки слое – от 1.00% до 6.40% с шагом 0.60% (далее – модель 3; в периферийном слое обогащение подбиралось таким образом, чтобы суммарное число ядер оставалось неизменным относительно базовой модели). Таким образом, если в модели 2 изменялось количество слоев, то в модели 3 при неизменности количества (2 слоя) параметрами являлись объемные доли слоев и их обогащение.

Во всех рассматриваемых моделях исходные геометрические размеры топливной таблетки оставались неизменными.

Задавался режим выгорания топлива при заданной плотности мощности 0.04 кВт/г. Время выгорания – 4 микрокампаний (каждая микрокампания составляет порядка 1 года), что эквивалентно 50 МВт·сут/кг. На каждом шаге снимались следующие величины: коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде ($K_{\text{беск}}$), доля запаздывающих нейтронов ($\beta_{\text{эфф}}$), выгорание топлива, мощность делений, коэффициент воспроизводства, концентрации отдельных нуклидов в каждом радиальном слое.

Также для всех моделей отслеживались эффекты реактивности: плотностной, эффект реактивности по температуре топлива при наличии теплоносителя, эффект реактивности по температуре топлива в отсутствии теплоносителя.

Расчеты в ПК Serpent производились с использованием библиотеки ядерных данных JEFF-3.1.1 [17].

Результаты каждой модели сравниваются с характеристиками базовой версии.

Результаты и обсуждение

1. Базовая модель.

Поскольку базовую модель мы далее будем сравнивать с другими моделями в контексте профилирования по выгоранию, ниже приводятся основные характеристики, в соответствие с которыми это сравнение, собственно, производится.

а) Зависимость $K_{\text{беск}}$ от времени.

Зависимость $K_{\text{беск}}$ от времени с учетом погрешности 3σ приведена на рисунке 2. Из полученного графика видно, что выбранная для данного расчета статистика нейтронов более чем достаточна для рассмотрения данной задачи.

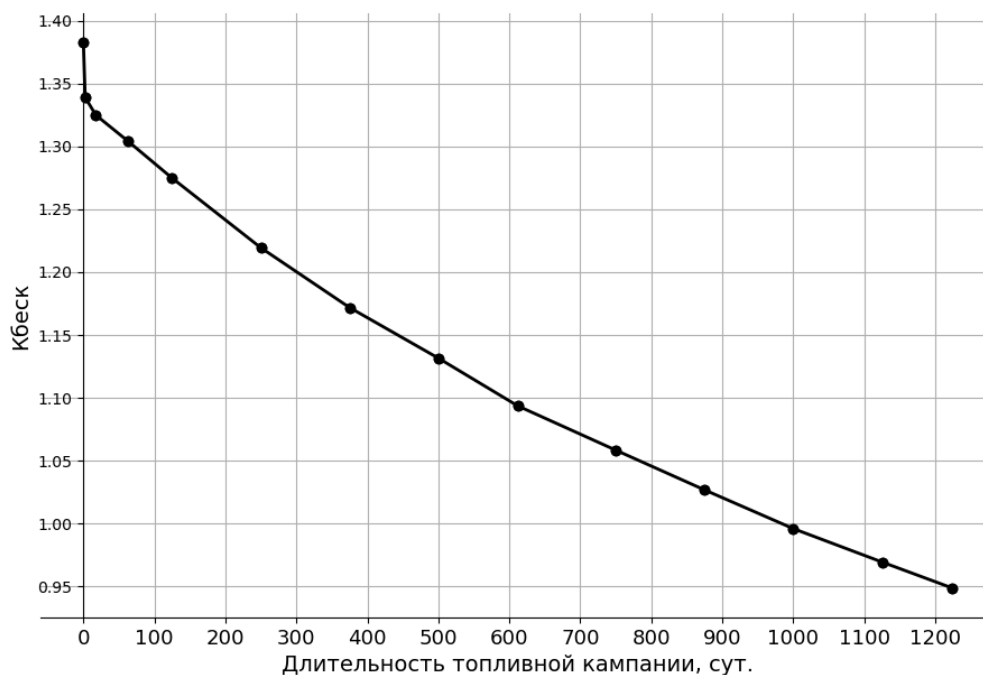


Рисунок 2. Зависимость $K_{\text{беск}}(t)$ для базовой модели
 Figure 2. Dependence on $K_{\text{inf}}(t)$ for the basic model

Первые шаги выгорания были выбраны относительно малыми для учета ксенонового отравления [18]. В дальнейшем происходило их увеличение до 5 МВт·сут/кг ближе к середине первой микрокампании, после этого шаг выгорания не изменялся.

Начальное быстрое снижение $K_{\text{беск}}$ объясняется накоплением ксенона и выходом его концентрации на стационарную.

Для сравнения моделей между собой далее будем использовать среднее значение $K_{\text{беск}}$ и средний тангенс угла наклона кривой $K_{\text{беск}}$ (т. н. средний темп потери реактивности).

Среднее значение будем вычислять по величинам $K_{\text{беск}}$ на конец каждой из 4-х микрокампаний:

$$\langle K_{\text{беск}} \rangle = \frac{K_{\text{беск}1}^{\text{кон}} + K_{\text{беск}2}^{\text{кон}} + K_{\text{беск}3}^{\text{кон}} + K_{\text{беск}4}^{\text{кон}}}{4} = 1.0434$$

Средний темп потери реактивности будем определять как разность между значениями $K_{\text{беск}}$ на начало и на конец кампании, отнесенную к длине топливной кампании:

$$T_{\text{пот}} = \frac{K_{\text{беск}}^{\text{нач}} - K_{\text{беск}}^{\text{кон}}}{t_{\text{max}}} = 3.55 \cdot 10^{-4} \text{ сут}^{-1}$$

б) Радиальный профиль энерговыделения.

Для получения распределения энерговыделений по топливной таблетке смоделированная в ПК Serpent элементарная ячейка разбивалась на 40000 точек, в каждой из которых при расчете соответствующего шага выгорания снималась величина энерговыделения.

На рисунке 3 приведены тепловые карты распределения энерговыделений относительно среднего по таблетке значения, соответствующие началу и концу кампании, причем «температура» каждой точки определяется величиной $\ln^3 \left(1 + \frac{E}{\langle E \rangle} \right)$, где E – энерговыделение в данной точке, $\langle E \rangle$ – среднее энерговыделение по топливной таблетке. Такой вид зависимости был подобран произвольно для наибольшей контрастности. Чем более красной является точка на тепловой карте, тем большее в ней энерговыделение относительно средней величины, чем более синяя – тем меньшее.

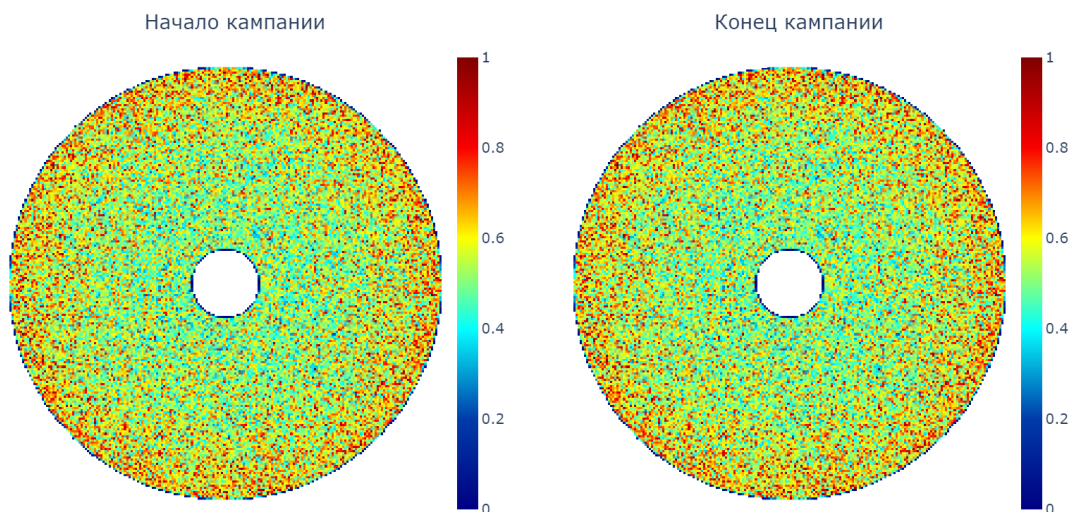


Рисунок 3. Радиальные зависимости энерговыделения (в отн. ед.) на начало и конец кампании для базовой модели

Figure 3. Radial dependences of energy release (in relative units) at the beginning and end of the campaign for the basic model

Как можно заметить, для базовой модели что в начале, что в конце кампании энерговыделение распределено по топливной таблетке практически равномерно, при этом на

периферии выделяется несколько больше энергии, что в основном объясняется более частым по сравнению с центральной частью делением ядер ^{239}Pu .

Из рисунка 3 можно увидеть, что на конец кампании энерговыделение на периферии топливной таблетки повышается (средняя по таблетке величина при этом остается неизменной).

2. Модель 2.

В результате нейтронно-физического расчета были получены радиальные зависимо-

сти выгорания топлива при разбиении таблетки на 2, 5, 10, 200 слоев.

Выравнивание выгорания для всех рассматриваемых вариантов модели 2 производилось согласно методике, описанной выше (см. пп. расчетная модель). В таблице 1 приведено сравнение нейтронно-физических характеристик рассматриваемых вариантов до и после профилирования.

Таблица 1. Результаты нейтронно-физических расчетов для моделей до и после профилирования
Table 1. Results of neutron physics calculations for models before and after profiling

Характеристика	Базовая модель	Кол-во слоев	1	2	3	4
Изменение $\langle K_{\text{беск}} \rangle$ относительно базовой модели, %	$0 (1.0434 \pm 0.0006)$	2 слоя	0.03	0.01	0.01	-0.01
		5 слоев	0.01	-0.02	0.02	-
		10 слоев	0.00	-0.03	-	-
		200 слоев	-0.01	-0.06	-	-
Изменение среднего темпа потери реактивности относительно базовой модели, %	$0 ((3.55 \pm 0.02) \cdot 10^{-4} \text{ сут}^{-1})$	2 слоя	0.19	-0.07	0.14	-0.05
		5 слоев	0.17	-0.01	-0.28	-
		10 слоев	-0.14	0.15	-	-
		200 слоев	-0.13	0.18	-	-
Изменение $\beta_{\text{эфф}}$ на начало кампании относительно базовой модели, %	$0 ((7.116 \pm 0.127) \cdot 10^{-3})$	2 слоя	3.66	-0.98	-2.80	-2.46
		5 слоев	0.17	-2.01	-2.84	-
		10 слоев	-0.30	-1.78	-	-
		200 слоев	-0.02	1.32	-	-

Как видно из таблицы 1, в модели 2 с 2-мя слоями итерационный процесс останавливается на 4-ой итерации, с 5-ю слоями – на 3-ей итерации, с 10-ю и 200-ми слоями – на 2-ой итерации. С каждой итерацией нерав-

номерность выгорания ядерного топлива снижается, причем с увеличением номера итерации скорость ее снижения также уменьшается.

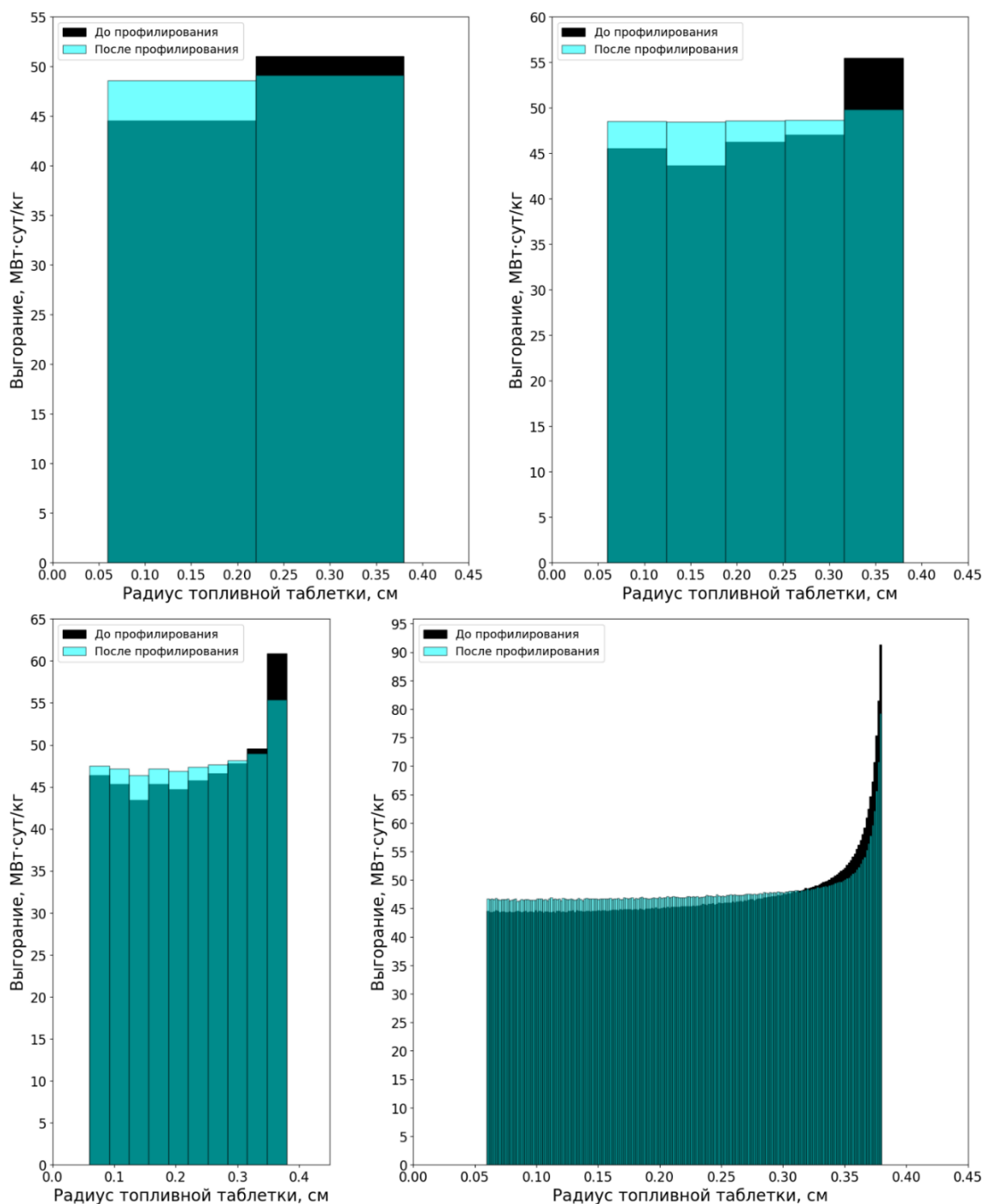


Рисунок 4. Сравнение радиальных профилей выгорания для топливной таблетки (модели 2а, 2б, 2в, 2г) до и после профилирования

Figure 4. Comparison of radial burnup profiles for fuel pellets (models 2a, 2b, 2c, 2d) before and after profiling

Среди рассчитанных профилированных моделей определялись наиболее оптимальные: так как в данном исследовании ставится цель найти пути увеличения срока службы твэлов в ядерном реакторе, то в результате процедуры профилирования не должны ухудшаться размножающие свойства среды.

Доля запаздывающих нейтронов на начало кампании при выборе оптимальных моделей не учитывалась ввиду незначительности ее изменения (при статистической погрешности 1.78%) она далее не принимается во внимание. Объясняется это тем, что изменение изотопного состава при выгорании (прежде всего, образование плутония) вносит более существенный вклад в изменение

доли запаздывающих нейтронов (с выгоранием она снижается до диапазона 0.4–0.5, то есть уменьшается в 1.3–1.6 раза).

Из рисунка 4 видно, что распределение выгорания по радиусу топливной таблетки имеет экспоненциальный характер, что согласуется с имеющимися экспериментальными данными [6].

Уменьшение коэффициента неравномерности выгорания (отношение максимального выгорания в некотором i -м слое к среднему выгоранию по топливной таблетке) по ТВЭЛ для разных вариантов составило: для 2-х слоев – 3.93%, для 5-и слоев – 11.50%, для 10-и слоев – 11.22%, для 200-а слоев – 24.48%. Безусловно, если детализировать модель и на большее количество слоев, фактор снижения неравномерности выгорания может быть более заметен, в данном аспекте важна качественная демонстрация результата.

Изменений в величинах КВ, а также в числе нарабатываемых ядер рассматриваемых нуклидов (в сумме по всей топливной таблетке) не обнаружено.

Поскольку практическое применение топливной таблетки, разбитой, к примеру, на

200 слоев, затруднительно из-за значительного увеличения длительности изготовления отдельной топливной таблетки и ее удорожания ввиду сложности возможных технологий изготовления [14,19], отдельно рассматривался следующий вариант: все слои в профилированной модели 2г, где выгорание ниже или равно среднему, были объединены в единый слой с обогащением, равным среднему для данных слоев. Для рассматриваемой модели это первые 173 слоя (если считать от центра топливной таблетки). Остальные (более близкие к периферии слои) задавались, как и ранее, как отдельные слои (далее – упрощенная модель).

Для того чтобы в результате сделанного упрощения число делящихся ядер в топливной таблетке не изменилось, также были рассчитаны поправочные коэффициенты подобно формуле (3), на которые умножалось обогащение.

Для упрощенной модели рассчитывались все те же характеристики, что и для самой модели 2.

На рисунке 5 приведено сравнение радиальных профилей выгорания модели 2г и упрощенной модели.

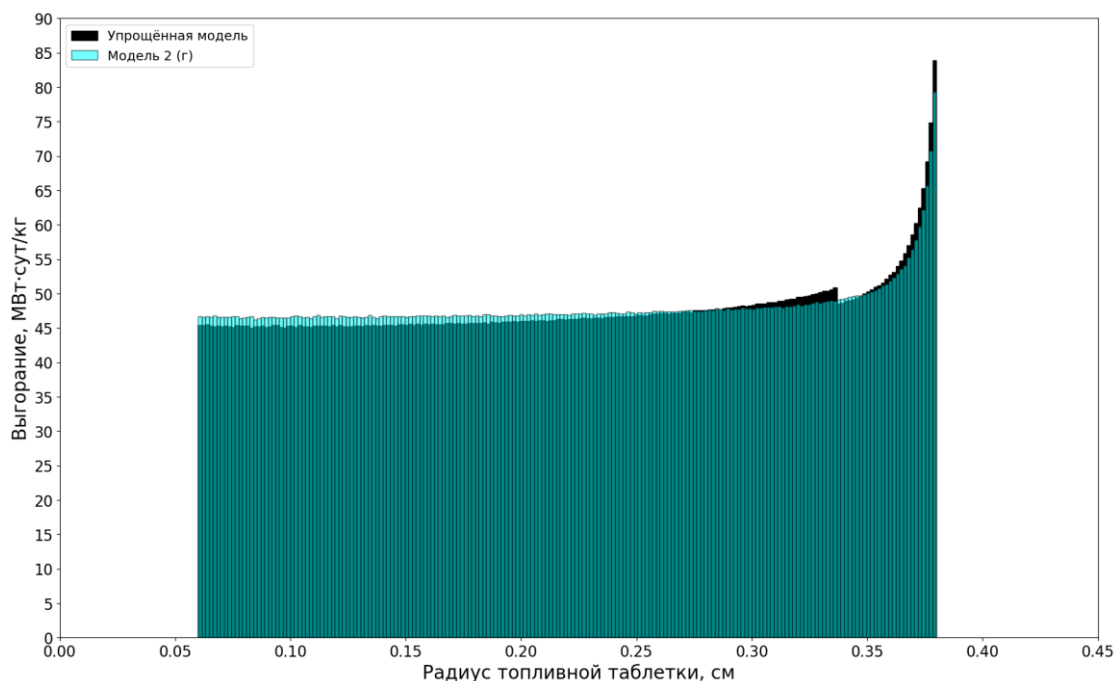


Рисунок 5. Сравнение радиальных профилей выгорания модели 2г и упрощенной модели
Figure 5. Comparison of radial burnout profiles of the 2d model and the simplified model

Как можно заметить, в результате описанного упрощения неравномерность выгорания несколько вырастает относительно модели 2г, но при этом также остается сниженной относительно базовой модели (на 15.03%).

Кроме того, из полученных для упрощенной модели результатов следует, что ее нейтронно-физические характеристики в пределах статистической погрешности совпадают с аналогичными характеристиками для модели 2г.

Как можно увидеть из рисунка 6, в результате профилирования повышается неравномерность энерговыделения в начале, и в конце топливной кампании (причем идентично для моделей 2г и упрощенной). В промежуточных точках энерговыделение по таблетке потенциально должно оказаться более близким к среднему значению, причем сниженным относительно базовой модели. Коэффициент неравномерности энерговыделения на начало кампании для моделей 2г и упрощенной составил соответственно 1.48 и 1.47 (для базовой модели – 1.48), на конец

кампании – 2.53 для обеих моделей (по сравнению с 2.54).

При этом, хотя коэффициенты неравномерности энерговыделения остаются неизменными, к концу кампании в результате профилирования фокус энерговыделения смещается на периферию (в то время, как в базовой модели распределение более равномерное).

При разбиении топливной таблетки на меньшее число слоев (модели 2а – 2в) в начале кампании энерговыделение будет происходить в основном в центральных слоях, в конце – в периферийных.

Влияние разницы в энерговыделениях в профилированных версиях на градиент температур и другие физические характеристики топлива необходимо рассмотреть в перспективе данной работы.

3. Модель 3.

Всего было рассчитано 10 подмоделей. Радиус границы между слоями, обогащения для соответствующих моделей, а также сравнение их нейтронно-физических характеристик приведены в таблице 2.

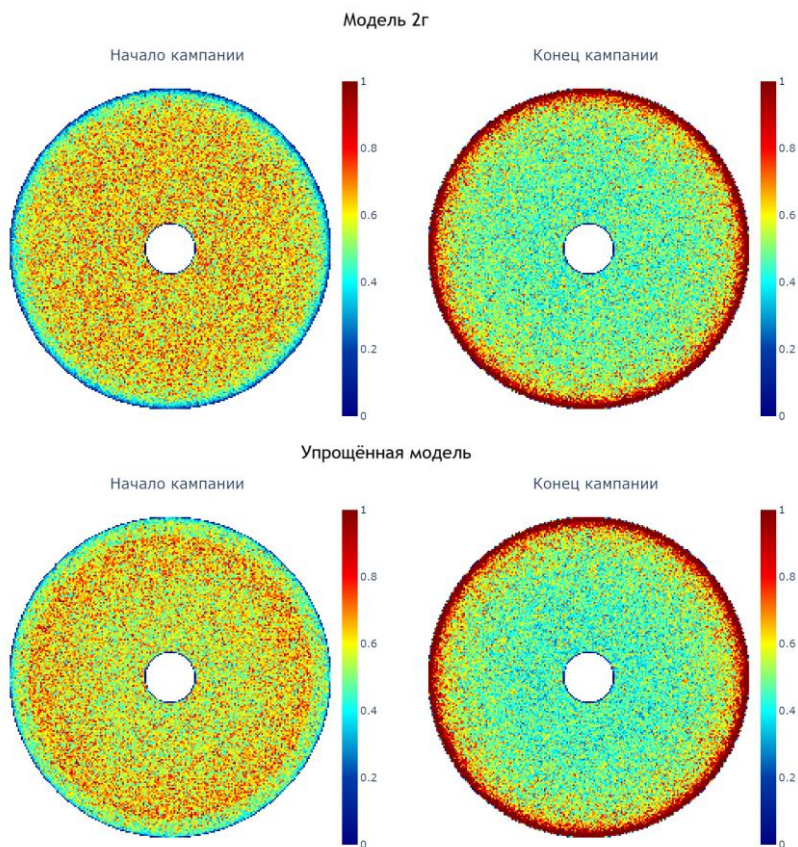


Рисунок 6. Радиальное распределение энерговыделений (в отн. ед.) для модели 2г и упрощенной модели
Figure 6. Radial distribution of energy emissions (in relative units) for the 2d model and the simplified model

Таблица 2. Результаты нейтронно-физических расчетов различных вариантов модели 3
Table 2. The results of neutron physics calculations of various variants of the model 3

Модель	Радиус границы между слоями, см	Обогащение слоя, %		Выгорание в слое, МВт·сут./кг		$\langle K_{\text{беск}} \rangle$	Средний темп потери реактивности, 10^{-4} сут $^{-1}$	$\beta_{\text{эфф}}$ на начало кампании
		Центр.	Периф.	Центр.	Периф.			
3а	0.0867	1.00	5.07	23.23	49.70	1.0438	3.56	0.007037
3б	0.1133	1.60	5.19	26.46	50.55	1.0442	3.56	0.007115
3в	0.1400	2.20	5.31	29.75	51.43	1.0437	3.55	0.007054
3г	0.1667	2.80	5.40	33.04	52.27	1.0441	3.56	0.006919
3д	0.1933	3.40	5.44	36.33	52.95	1.0438	3.56	0.006963
3е	0.22	4.00	5.40	39.66	53.31	1.0438	3.56	0.007246
3ж	0.2467	4.60	5.19	43.04	53.03	1.0440	3.55	0.006875
3з	0.2733	5.20	4.70	46.49	51.50	1.0435	3.55	0.007041
3и	0.3000	5.80	3.60	50.06	47.22	1.0434	3.54	0.007019
3к	0.3267	6.40	0.98	53.83	35.64	1.0432	3.52	0.007147

Статистическая погрешность $K_{\text{беск}} = 6 \cdot 10^{-4}$
 Статистическая погрешность $\beta_{\text{эфф}} = 1.27 \cdot 10^{-4}$

Можно заметить, все модели, за исключением моделей 3б, 3г, 3к, имеют идентичные нейтронно-физические характеристики в пределах статистической погрешности по $K_{\text{беск}}$ и $\beta_{\text{эфф}}$ в сравнении друг с другом и базовой моделью. $\langle K_{\text{беск}} \rangle$ для модели 3к также совпадает в пределах статистической погрешности с соответствующей величиной для базовой модели.

Среди трех выделенных моделей можно выделить 2 принципиально отличных друг от друга случая. Первый случай: в центральной части топливной таблетки находится низкообогащенное тонкое кольцо, а вокруг – слой с повышенным в несколько раз обогащением (модель 3б и 3г). Второй случай: центральная часть представляет собой относительно толстый слой с высоким обогаще-

нием по ^{235}U , периферийный слой – довольно тонкое кольцо со значительно сниженным обогащением (модель 3к).

При этом, поскольку в моделях 3б и 3г обогащение на периферии в начале топливной кампании оказывается повышенным относительно базовой модели, данные модели оказываются неэффективными в плане решения поставленной задачи: формирование гит-слоя в них в результате повышенного обогащения ускоряется.

Кроме того, как видно из приведенной на рисунке 7 тепловой карты энерговыделений, значительным недостатком моделей, подобных по своей структуре моделям 3б и 3г, является неэффективное использование делящегося материала, расположенного в центральной части топливной таблетки.

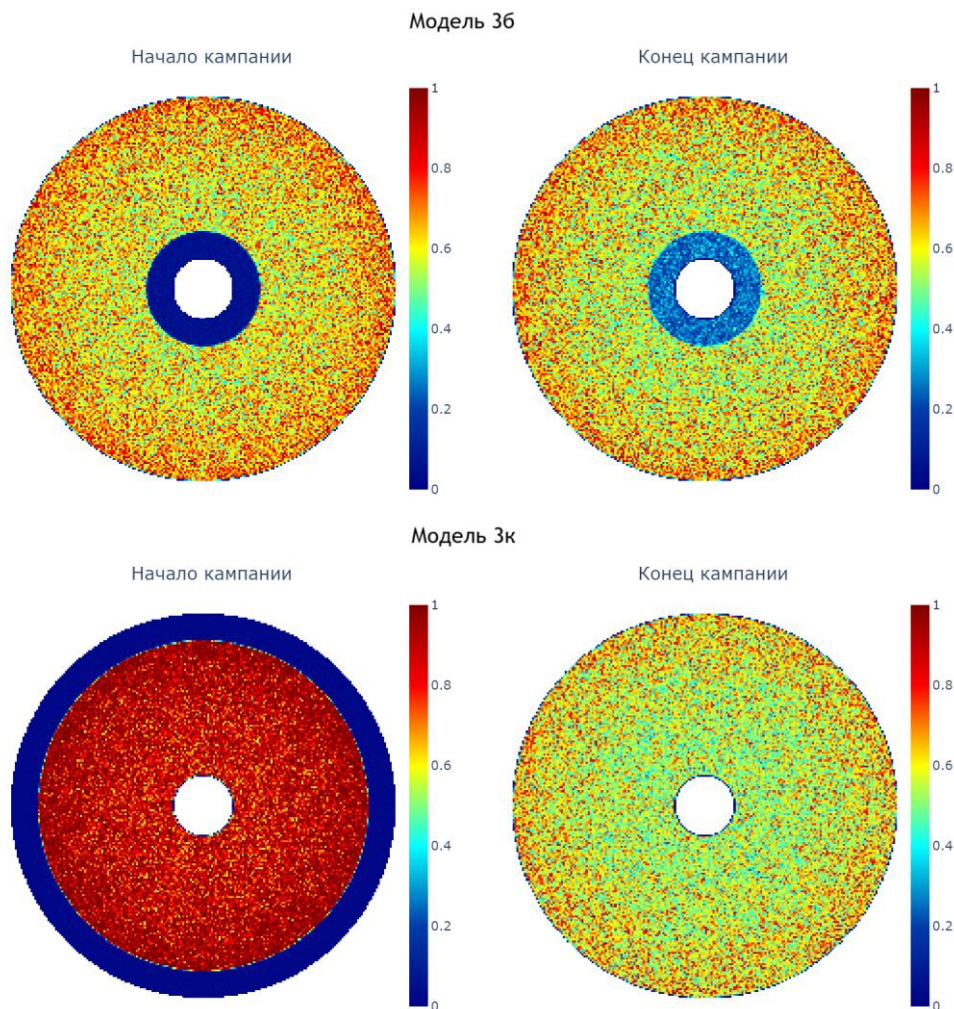


Рисунок 7. Радиальное распределение энерговыделений (в отн. ед.) для моделей 3б и 3к
Figure 7. Radial distribution of energy emissions (in relative units) for models 3b and 3j

При более длительной эксплуатации топливной таблетки из модели 3к выгорание должно оказаться более равномерным в результате образования значительного количества ^{239}Pu на периферии. Однако для получения больших глубин выгорания требуется топливо большего обогащения в среднем по топливной таблетке, что потребует дополнительной оценки оптимального соотношения размеров слоев и их обогащений.

В сумме по топливной таблетке ни в одной из моделей не происходит наработки избыточного количества минорных актинидов относительно базовой модели, но при этом фокус их образования смещается преимущественно в периферийную часть.

В результате продление топливной кампании потенциально возможно только для рассмотренной здесь модели 3к, которая качественно совпадает с полученными при

профилировании различными вариантами модели 2.

4. Эффекты реактивности.

Для отслеживания потенциального изменения эффектов реактивности в результате профилирования топливной таблетки производились нейтронно-физические расчеты для базовой модели и для модели 2г в 3-х точках: в начале, середине и конце кампании.

С целью отслеживания плотностного эффекта реактивности производились нейтронно-физические расчеты в ПК Serpent с изменением плотности воды от 0.001% (эффект опустошения) до 150% от плотности воды в номинальном режиме работы (номинальной плотностью принята 0.7 г/см^3). Для отслеживания эффектов реактивности по температуре топлива при наличии теплоносителя и при его отсутствии

(при постоянной плотности воды, соответственно 0.001% и 100% от плотности в номинальном режиме работы) температура топлива изменялась от 300 до 3000 К.

Результаты расчета эффектов реактивности на рисунке 8:

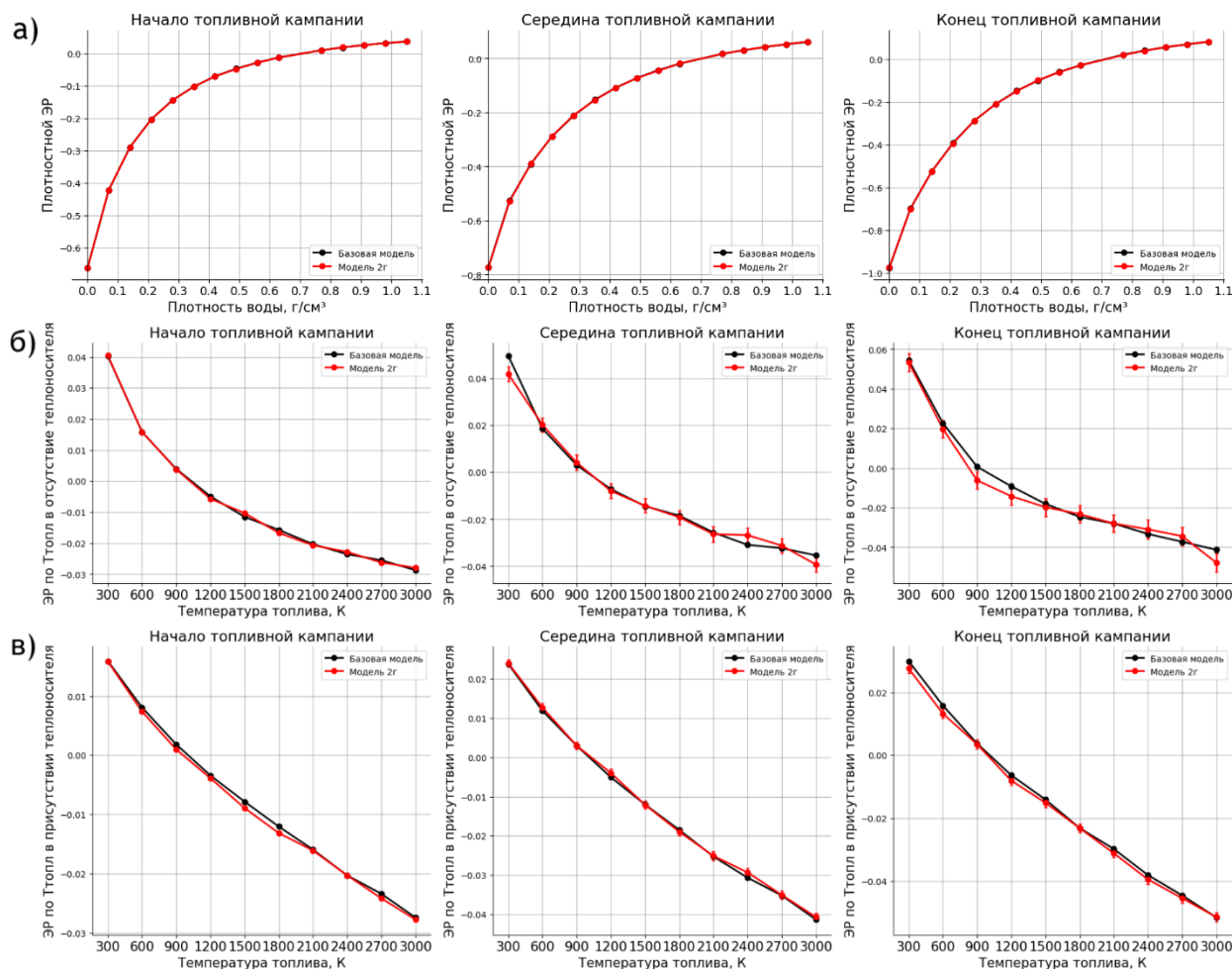


Рисунок 8. Сравнение эффектов реактивности для базовой модели и модели 2г (а – плотностной эффект реактивности, б – эффект реактивности по температуре топлива в отсутствие теплоносителя, в – эффект реактивности по температуре топлива в присутствии теплоносителя)

Figure 8. Comparison of reactivity effects for the basic model and the 2d model (a – density reactivity effect, б – fuel temperature reactivity effect in the absence of coolant, c – fuel temperature reactivity effect in the presence of coolant)

Как можно заметить, величины эффектов реактивности в результате профилирования не изменяются, так как совокупный нуклидный состав топлива остается неизменным, а пространственные эффекты от размещения делящихся ядер обратно пропорционально выгоранию незначительны.

Величины эффектов реактивности для упрощенной модели лежат в диапазоне между соответствующими значениями для базовой модели и модели 2г, поэтому здесь не приводятся.

Заключение

В данной работе проведен поиск оптимального способа перераспределения делящегося материала по радиусу топливной таблетки для снижения радиальной неравномерности выгорания твэлов, исследовано влияние данного способа на нейтронно-физические характеристики на примере элементарной ячейки реактора ВВЭР-1200. Оптимальными среди рассмотренных вариантов можно назвать модели 2-ую упрощенную и 3к. Преимуществом упрощенной модели является снижение неравномерности выгорания на 15.03% при практически неизмен-

ном распределении энерговыделения относительно исходной модели. Преимущество модели 3к состоит в снижении темпа потери реактивности. Однако имеется существенный радиальный градиент энерговыделения в топливной таблетке, влияние которого на характеристики таблетки актуально рассмотреть в будущем.

Радиальное профилирование твэлов по выгоранию может быть применено для продления срока их эксплуатации в ядерном реакторе, поскольку при этом возникает запас срока службы конструкционных и топливных материалов. При этом, конечно, непосредственно для продления топливной кампании необходимо повышать обогащение топлива.

Обнаружено, что при условии сохранения неизменной мощности ядерного реактора не

происходит изменение средних по твэлу изотопных составов на конец топливной кампании. При этом зоны наибольшего образования плутония и других минорных актинидов смещаются в периферийные слои, в результате чего изменяется радиальное распределение энерговыделений в твэле.

Учет изменения температур при профилировании обогащения топлива важен для обеспечения безопасности топливной таблетки и, возможно, будет осуществлен в дальнейшем при осуществлении теплогидравлического расчета. Кроме того, актуально исследование влияния азимутальных и радиальных неравномерностей распределения плотности потока нейтронов на характеристики профилированного топлива.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Андрианов А.Н., Баранов В.Г., Тихомиров Г.В., Хлунов А.В. Моделирование ядерно-физических процессов в поверхностном слое топливного сердечника. *Атомная энергия*. 2008;104(6):353–358. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1792> (дата обращения: 22.07.2025).
Andrianov A.N., Baranov V.G., Tikhomirov G.V., Khlunov A.V. Modeling of nuclear physical processes in the surface layer of a fuel core. *Atomnaya Energiya*. 2008;104(6):353–358. (In Russ.). Available at: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1792> (accessed: 22.07.2025).
2. Хашламунов Т.М.Р.С. Оптимизация параметров удлиненных топливных загрузок для реакторов ВВЭР-1000 (1200) с целью минимизации эксплуатационных затрат на АЭС: автореферат дис. кандидата технических наук: 05.14.03. М., 2018. Режим доступа: <https://openrepository.mephi.ru/entities/publication/b9002140-be9b-46ba-95a8-473a2a9b1faf> (дата обращения: 22.07.2025).
Hashlamun T.M.R.S. Optimization of parameters of extended fuel loads for VVER-1000 (1200) reactors in order to minimize operating costs at NPPs: abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 05.14.03. M., 2018. (In Russ.). Available at: <https://openrepository.mephi.ru/entities/publication/b9002140-be9b-46ba-95a8-473a2a9b1faf> (accessed: 22.07.2025).
3. Гердт Э. А., Внуков Р. А. Сравнительный анализ методов аксиального профилирования ТВС реактора ВВЭР-1200 на примере модели Z49A2. *Глобальная ядерная безопасность*. 2022;3(44):65–72. <https://doi.org/10.26583/gns-2022-03-06>
Gerdt E. A., Vnukov R. A. Comparative Analysis of Methods for Axial Profiling of the WVER-1200 Fuel Assembly Using an Example of Model Z49A2. *Global nuclear safety*. 2022;3(44):65–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2022-03-06>
4. Leonard F.P. Van Swam. Nuclear fuel pellet. Patent № 005991354A United States, Int. Cl⁶. G21C 3/16, G21C 3/32. Заявка № 08/988,200 dated 26.11.1997; опубл. 23.11.1999. Available at: <https://patents.google.com/patent/US5991354A/en> (accessed 22.07.2025).
5. Restani R., Horvath M., Goll W., Bertsch J., Gavillet D., Hermann A., Martin M., Walker C.T. On the condition of UO₂ nuclear fuel irradiated in a PWR to a burn-up in excess of 110 MWd/kgHM. *Journal of Nuclear Materials*. 2016;481:88–100. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2016.08.023>
6. Matzke H., Spino J. Formation of the Rim Structure in High Burnup Fuel. *Journal of Nuclear Materials*. 1997;248:170–179. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(97\)00171-2](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(97)00171-2)
7. Ayanoglu M., Montgomery R., Harp J., Sasikumar Y. Metallographic examinations and hydrogen measurements of high-burnup spent nuclear fuel cladding. *Journal of Nuclear Materials*. 2024;589: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154833>
8. Баранов В.Г., Хлунов А.В., Курина И.С., Иванов А.В., Тенишев А.В., Тихомиров Г.В., Тимошин И.С. Комбинированная таблетка ядерного топлива. Патент № 2427936 C1 Российская Федерация, МПК G21C 3/00.

Заявка № 2010105647/07 от 18.02.2010; опубл. 27.08.2011. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU2427936C1_20110827 (дата обращения: 22.07.2025).

Baranov V.G., Khlunov A.V., Kurina I.S., Ivanov A.V., Tenishev A.V., Tikhomirov G.V., Timoshin I.S. Combined nuclear fuel pellet. Patent № 2427936 C1 Russian Federation, MPC G21C 3/00. Application № 2010105647/07 dated 18.02.2010; published 27.08.2011. (In Russ.). Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2427936C1_20110827 (access date: 22.07.2025).

9. Богданов Е.А. Получение, свойства и области применения функциональных тонкопленочных оксидных покрытий: автореферат дис. кандидата технических наук: 05.16.06. — СПб, 2017. Режим доступа: <https://elibr.spbstu.ru/dl/2/r17-63.pdf/download/r17-63.pdf> (дата обращения: 22.07.2025).

Bogdanov E.A. Preparation, properties and applications of functional thin-film oxide coatings: abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 05.14.03. — М., 2018. (In Russ.). Available at: <https://elibr.spbstu.ru/dl/2/r17-63.pdf/download/r17-63.pdf> (accessed: 22.07.2025).

10. Мельников Е.В., Митин В.И., Крайнов Ю.А., Проселков В.Н., Панюшкин А.К., Калинушкин А.Е., Семченков Ю.М. Способ нанесения покрытия из выгорающего поглотителя нейтронов на основу – топливные таблетки из диоксида урана. Патент № 2175151 C1 Российская Федерация, МПК G21C 3/20, G21C 3/62. Заявка №2000117494 от 05.07.2000; опубл. 20.10.2001. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU2175151C1_20011020 (дата обращения: 22.07.2025).

Melnikov E.V., Mitin V.I., Kraynov Y.A., Proselkov V.N., Panushkin A.K., Kalinushkin A.E., Semchenkov Y.M. The method of applying a coating from a fading neutron absorber to the base is fuel tablets made of uranium dioxide. Patent № 2175151 C1 Russian Federation, MPC G21C 3/20, G21C 3/62. Application № 2000117494 dated 05.07.2000; published 20.10.2001. (In Russ.). Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2175151C1_20011020 (accessed: 22.07.2025).

11. Шалумов Б.З., Коваленко В.М., Дьякова В.В. Способ получения оксидных покрытий. Патент № 2060236 C1 Российская Федерация, МПК C03C 17/25. Заявка № 5006020/33 от 27.08.1991; опубл. 20.05.1996. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU2060236C1_19960520 (дата обращения: 22.07.2025).

Shalumov B.Z., Kovalenko V.M., Dyakova V.V. Method of obtaining oxide coatings. Patent № 2060236 C1 Russian Federation, MPC C03C 17/25. Application № 5006020/33 dated 27.08.1991; published 20.05.1996. (In Russ.). Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2060236C1_19960520 (accessed: 22.07.2025).

12. Glen E. McDonald. Method for depositing an oxide coating. Patent № US4350574A United States, Int. Cl.³ C25D9/08. Заявка № 246,772 dated 23.03.1981; опубл. 21.09.1982. Available at: <https://patents.google.com/patent/US4350574A/en> (accessed: 22.07.2025).

13. Годин Ю.Г., Тенишев А.В., Новиков В.В. Физическое материаловедение: Учебник для вузов. Под общей ред. Б.А. Калина. Том 6, часть 2. Ядерные топливные материалы. М.: МИФИ, 2008. 604 с.

Godin Y.G., Tenishev A.V., Novikov V.V. Physical materials science: A textbook for universities. Under the general editorship of B.A. Kalin. Volume 6, Part 2. Nuclear fuel materials. М.: МЕРФИ, 2008. 604 p. (In Russ.).

14. Зайцев В.А., Зайцев П.А. Ядерное топливо с покрытием. М.: Техносфера, 2018. 240 с. Режим доступа: https://elibr.biblioatom.ru/text/zaytsev_yadernoe-toplivo-s-pokrytiem_2018/ (дата обращения: 22.07.2025).

Zaytsev V. A., Zaytsev P.A. Coated nuclear fuel. М.: Technosfera, 2018. 240 p. (In Russ.). Available at: https://elibr.biblioatom.ru/text/zaytsev_yadernoe-toplivo-s-pokrytiem_2018/ (accessed: 22.07.2025).

15. Leppanen J., PSG/SERPENT – A Continuous Energy Monte-Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code, Helsinki: VTT Technical Research Centre of Finland. 2015. Available at: https://serpent.vtt.fi/serpent/download/Serpent_manual.pdf (accessed: 22.07.2025).

16. Dufek, J., Kotlyar, D., Shwageraus, E., Leppänen, J. Numerical stability of the predictor–corrector method in Monte Carlo burnup calculations of critical reactors. *Annals of Nuclear Energy*. 2013;56:34–38. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.01.018>

17. Nuclear Energy Agency (NEA) – The JEFF-3.1.1 Nuclear Data Library. Available at: https://oecd-neo.org/jcms/pl_14470/the-jeff-3-1-1-nuclear-data-library (accessed: 22.07.2025).

18. Noura H. Hafez, Hesham Shahbunder, Esmat Amin, S. U. El-Kamessy, S. A. Elfiki, Ahmed Latef. The Effect of burnable absorbers on neutronic parameters of VVER1200 reactor. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020;956. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/956/1/012007>

19. Митин В. С., Бибилашвили Ю.К., Краснобаев Н.Н., Петрухин А.П., Афонин М.М. Таблетка ядерного топлива с покрытием (ее варианты), способ нанесения покрытия и установка для осуществления способа. Патент № 2131626 C1 Российская Федерация, МПК G21C 3/00, G21C 3/20, G21C 3/326, G21C 7/04, G21C 21/02. Заявка № 96117361/25 от 27.08.1996; опубл. 10.06.1999. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU2131626C1_19990610 (дата обращения: 22.07.2025).

Mitin V. S., Bililashvili Y. K., Krasnobaev N. N., Petrukhin A. P., Afonin M. M. A coated nuclear fuel tablet (its variants), a coating method, and an installation for implementing the method. Patent № 2131626 C1 Russian Federation, MPC G21C 3/00, G21C 3/20, G21C 3/326, G21C 7/04, G21C 21/02. Application № 96117361/25 dated 27.08.1996; published 10.06.1999. (In Russ.). Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2131626C1_19990610 (accessed: 22.07.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Попов М.А. – изучение литературных источников по теме исследования, нейтронно-физический расчет, написание текста статьи;

Внуков Р.А. – постановка задачи, нейтронно-физический расчет, проверка результатов, редактирование текста статьи;

Колесов В.В. – постановка задачи, редактирование текста статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Максим Александрович Попов, студент, Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0003-5617-7059>

e-mail: maksim.popovf@yandex.ru

Руслан Адхамович Внуков, старший преподаватель, Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-2048-0828>

e-mail: vnukovra@oiate.ru

Валерий Васильевич Колесов, кандидат физ.-мат. наук, доцент, Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-8905-1995>

e-mail: valeri-kolesov@yandex.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Popov M.A. – study of reference sources on the research topic, neutron physics calculation, writing the text of the article;

Vnukov R.A. – setting the task, neutron physics calculation, verification of results, editing the text of the article;

Kolesov V.V. – setting the task, editing the text of the article.

FUNDING:

The study had no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Maksim A. Popov, Student, Obninsk Institute of Atomic Energy the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Obninsk, Kaluga region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0003-5617-7059>

e-mail: maksim.popovf@yandex.ru

Ruslan A. Vnukov, Senior lecturer, Obninsk Institute of Atomic Energy the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Obninsk, Kaluga region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-2048-0828>

e-mail: vnukovra@oiate.ru

Valeriy V. Kolesov, Cand. Sci. (Phys. and Math), Obninsk Institute of Atomic Energy the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Obninsk, Kaluga region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-8905-1995>

e-mail: valeri-kolesov@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 31.03.2025

После доработки / Revision 23.07.2025

Принята к публикации / Accepted 29.07.2025

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-2025-03-08>

EDN WXRМНТ

Оригинальная статья / Original paper



Национальные проекты в сфере атомной энергетики:
сравнение опыта России, Китая и Индии

О.В. Фокина , И.В. Исупов

Вятский государственный университет, г. Киров, Российская Федерация

 fokina@vyatsu.ru

Аннотация. В статье изложены результаты анализа проектной деятельности в области атомной энергетики для России, Китая и Индии. Цель работы состоит в сопоставлении опыта стран в разработке и реализации национальных проектов в области атомной энергетики. Представлен краткий обзор развития проектной деятельности стран, подчеркнута роль государства, названы ведущие национальные проекты, отмечены цели и основные показатели их реализации, выделены перспективные задачи в области атомной энергетики. Новизна исследования состоит в сравнении опыта стран в разработке и реализации национальных проектов в сфере атомной энергетики по ключевым аспектам, что позволяет получить систематизированное представление о лучших практиках, выявить общие тенденции и различия, а также сформулировать рекомендации для повышения безопасности и эффективности отрасли. Предложены общие направления политики в сфере ядерной энергетики, которые опираются на опыт России, Китая и Индии. **Методология и методы.** Методология исследования основывается на систематическом обзорном подходе, включающем сбор, отбор и анализ существующих публикаций, нормативной, статистической документации и отчетности по теме национальных проектов России, Китая и Индии в сфере атомной энергетики. В исследовании применялись общенаучные методы в виде теоретического анализа, логического и аналитического методов, синтеза, метода сопоставления и сравнения, графического метода. Валидация выводов осуществлялась путем сопоставления материалов из разных источников и их качественной переработки с целью обеспечения воспроизводимости и достоверности полученных заключений. **Результаты.** Представлен обзор развития проектной деятельности стран в сфере ядерной энергетики на национальном уровне, подчеркнута роль государственных органов, названы ведущие национальные проекты, отмечены цели, целевые показатели и ключевые мероприятия в рамках их реализации, представлено выполнение отдельных целевых показателей российского национального проекта «Новые атомные и энергетические технологии» в сфере атомной энергетики» и дана оценка выполнения планов Китая и Индии, названы основные задачи в области атомной энергетики стран, произведено сравнение опыта стран в разработке и реализации национальных проектов в сфере атомной энергетики по ключевым аспектам, выделены особенности, общие черты и различия в подходах стран к ведению проектной деятельности, предложены общие направления политики в сфере ядерной энергетики, которые опираются на опыт России, Китая и Индии и могут быть полезны для формирования государственной стратегии. **Обсуждение.** Результаты исследования позволили выявить и сравнить особенности проектной деятельности в атомной энергетике в Российской Федерации, Китайской народной республике и Республике Индия, разработать общие направления политики в сфере ядерной энергетики, которые опираются на опыт стран. Тем не менее, требуется постоянная актуализация представленной информации, обусловленная активным развитием ядерной энергетики не только в названных странах, но и во всем мире. Также представляют интерес вопросы международного сотрудничества, направленного на повышение безопасности, снижение рисков и повышение доверия к ядерной энергетике на глобальном уровне.

Ключевые слова: атомная энергетика, национальные проекты, ключевые показатели, регуляторы, реакторы, энергетическая мощность, технологии, безопасность.

Для цитирования: Фокина О.В., Исупов И.В. Национальные проекты в сфере атомной энергетики: сравнение опыта России, Китая и Индии. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(3):93–107. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-08>

For citation: Fokina O.V., Isupov I.V. National projects in the field of nuclear energy: a comparison of Russia, China and India. *Nuclear Security*. 2025;15(3):93-107. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-08>

National projects in the field of nuclear energy: a comparison of Russia, China and India

O.V. Fokina  , I.V. Isupov

Vyatka State University, Kirov, Russian Federation

 fokina@vyatsu.ru

Abstract. The article presents the results of the analysis of project activities in the field of nuclear energy for Russia, China and India. The purpose of the work is to compare the experience of countries in the development and implementation of national projects in the field of nuclear energy. A brief overview of the development of the countries' project activities is presented, the role of the state is emphasized, the leading national projects are named, the goals and main indicators of their implementation are noted, promising tasks in the field of nuclear energy are highlighted. The novelty of the study is to compare the experience of countries in the development and implementation of national projects in the field of nuclear energy in key aspects, which allows us to get a systematic understanding of best practices, identify common trends and differences, and formulate recommendations for improving the safety and efficiency of the industry. General policy directions in the field of nuclear energy are proposed, which are based on the experience of Russia, China and India. **Methodology and Methods.** The research methodology is based on a systematic review approach, including the collection, selection and analysis of existing publications, regulatory, statistical documentation and reporting on national projects of Russia, China and India in the field of nuclear energy. The research used general scientific methods in the form of theoretical analysis, logical and analytical methods, synthesis, the method of comparison and comparison, and the graphical method. Validation of the conclusions was carried out by comparing materials from different sources and their qualitative processing in order to ensure reproducibility and reliability of the conclusions obtained. **Results.** An overview of the development of countries' project activities in the field of nuclear energy at the national level is presented, the role of government agencies is emphasized, leading national projects are named, goals, targets and key activities within their implementation are noted, the fulfillment of certain targets of the Russian national project "New Nuclear and Energy Technologies in the field of nuclear Energy" is presented and an assessment is given implementation of the plans of China and India, the main tasks in the field of nuclear energy of the countries are named, The experience of countries in the development and implementation of national projects in the field of nuclear energy in key aspects is compared, features, common features and differences in the approaches of countries to project activities are highlighted, general directions of policy in the field of nuclear energy are proposed, which are based on the experience of Russia, China and India and can be useful for the formation of a state strategy. **Discussion.** The results of the study made it possible to identify and compare the specifics of project activities in the nuclear energy sector in the Russian Federation, the People's Republic of China and the Republic of India, and to develop common policies in the field of nuclear energy based on the experience of the countries. Nevertheless, constant updating of the information provided is required, due to the active development of nuclear energy not only in these countries, but throughout the world. Issues of international cooperation aimed at improving safety, reducing risks and increasing confidence in nuclear energy at the global level are also of interest.

Keywords: nuclear energy, national projects, key indicators, regulators, reactors, energy capacity, technologies, safety.

Введение

Государственные проекты в сфере атомной энергетики являются важным элементом энергетической политики и стратегии развития стран, играя ключевую роль в обеспечении энергетической безопасности, устойчивого экономического роста и экологической стабильности. Атомная энергетика уменьшает зависимость от углеводородных источников, минимизирует выбросы парниковых газов, что помогает в борьбе с климатическими изменениями, гарантирует стабильное и предсказуемое производство энергии, а также содействует развитию инновацион-

ных технологий. Это определяет перспективность ядерной энергетики как одного из ключевых решений для устойчивого будущего, способствующего удовлетворению растущих потребностей в энергии.

Целью исследования является сопоставление опыта России, Китая и Индии в разработке и реализации национальных проектов в области атомной энергетики как примеров стран, активно развивающих и реализующих крупномасштабные национальные проекты. Изучение развития проектной деятельности в обозначенной отрасли, обозначение роли государства, выделение ведущих нацио-

нальных проектов, анализ целей и ключевых показателей проектов, определение перспективных задач в области атомной энергетики позволили достичь поставленной цели.

Методология и методы

Методология исследования основывается на систематическом обзорном подходе, включающем сбор, отбор и анализ существующих публикаций, нормативной, статистической документации и отчетности по теме национальных проектов стран России, Китая и Индии в сфере атомной энергетики. В исследовании применялись общенаучные методы в виде теоретического анализа, синтеза, логического и аналитического методов, метода сопоставления и сравнения, графического метода. Валидация выводов осуществлялась путем сопоставления материалов из разных источников и их качественной переработки с целью обеспечения воспроизводимости и достоверности полученных заключений.

Анализ научной литературы по заявленной тематике показал высокую степень заинтересованности ученых различных стран в вопросах разработки и реализации проектов в атомной энергетике. Вопросы взаимодействия государств рассмотрены в работах Т. Чжана [1], М. Каи [2], А.Е. Винокуровой [3], Н. Савиной [4] и других авторов. Отмечено, что для одних сторон энергетическое сотрудничество является ключевым компонентом экономического развития с привлечением иностранных инвестиций, для других – способом достижения экономической безопасности, обеспечения потребностей экономики ресурсами и снижения зависимости от иностранных поставок углеводородного сырья. Сотрудничество между странами представляет собой достижение взаимовыгодного интереса, имеет стратегический характер, но при этом нуждается в долгосрочном планировании, повышении доверия и правовом подкреплении. При этом взаимодействие стран должно осуществляться не только в направлении увеличения объемов поставок энергоресурсов, но и в виде совместных разработок инновационных технологий, реализации высокотехнологич-

ных проектов, создания совместных предприятий, обмене специалистами и пр.

Приоритеты в области проектной деятельности в сфере атомной энергетики, рассматривают Н.К. Савельева [5], С. Хурия [6], Н.В. Горин [7]. Как указано, развитие атомной энергетики является единственно возможным способом решения глобальных энергетических и экологических проблем, но, вместе с тем, отмечено негативное воздействие ядерных объектов на окружающую среду и одновременно их уязвимость перед природными явлениями и изменением климата. Основные решения должны быть направлены на повышение эффективности и безопасности производства и обращения с отходами, технологическое обновление компонентов систем.

Финансирование проектов в области ядерной энергетики является предметом обсуждения в работах В.Е. Галковской [8], О.В. Савчиной [9], Ф.П. Люсе [10]. На принятие решения о финансировании оказывают влияние не только параметры проектов, но и сложная комбинация юридических, политических, финансовых и технических факторов, где экономическая целесообразность проектов неразрывно связана с оценкой рисков инвестирования, а также с пониманием механизмов их сокращения. Значительное влияние на атомные энергетические компании в настоящее время оказывают макроэкономические и геополитические факторы, которые создают ряд сложностей в их деятельности. Особое место в исследованиях отводится программам финансирования проектов по современным схемам.

Вопросы проектного управления на объектах атомной энергетики рассмотрены в работах А.С. Тонояна [11] и Д.Д. Гебремайкла [12]. В мировой ядерной энергетике управление проектами считается важнейшим фактором успеха, где крайне важно иметь четкое представление о вопросах стандартизации и обеспечения безопасности. Уникальные требования отрасли в виде строгого регулирования, соблюдения нормативов, экспертизы определяют необходимость поддержания технической компетентности специалистов, умения эффективно решать задачи в условиях высокой ответ-

ственности и реагирования на вызовы отрасли.

Несмотря на интерес научной общественности к вопросам проектного управления в ядерной энергетике, анализ источников выявил отсутствие сравнительного анализа проектов в разных странах на национальном уровне, позволяющего получить систематизированное представление о лучших практиках, выявить общие тенденции и различия, сформулировать рекомендации для повышения безопасности и эффективности отрасли.

Опыт Российской Федерации

Вклад страны в развитие атомной энергетики начался в 1940-х гг. Первая в мире атомная электростанция была построена в 1954 г. в городе Обнинске. В 1960–1970-х гг. было начато строительство Ленинградской, Кольской и Белоярской АЭС – первой в мире станцией с реактором на быстрых нейтронах. Период с 1980 по 2000 гг. характеризуется трансформацией атомной энергетики, заложившей основу для последующего развития отрасли. В 2010 г. разработана Федеральная целевая программа (ФЦП) «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010–2015 гг. и на перспективу до 2020 года», включающая проекты многоцелевых и исследовательских реакторов на быстрых нейтронах, стендовых и моделирующих комплексов, термоядерных проектов. В 2019 г. программа была досрочно закрыта в связи с решением начать практическое применение результатов. В 2015 г. принята ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 гг. и на период до 2030 года», предусматривающая выполнение проектов по строительству пунктов хранения и захоронения отходов и созданию технологий по их переработке, выводу из эксплуатации опасных объектов, реабилитации загрязненных территорий, укреплению систем мониторинга. В 2025 г. была утверждена новая редакция госпрограммы «Развитие атомного энергопромышленного комплекса», включающая проекты по строительству новых и модернизации действующих энергоблоков, обеспечению безопасной и устойчивой работы действующих реакторов, строительству АЭС за

рубежом, участием в деятельности международных организаций.

В качестве наиболее крупных проектов в истории ядерной энергетики России следует выделить:

- пуск первой в мире атомной электростанции, 1954 г.;
- запуск первых в мире реакторов на быстрых нейтронах БР-1,2, 1955 и 1956 гг.;
- сдача в эксплуатацию первого в мире ледохода «Ленин» с ядерной энергетической установкой, 1959 г.;
- запуск первого водо-водяного энергетического реактора ВВЭР-1 на Нововоронежской АЭС, 1964 г.;
- запуск первого реактора большой мощности канального РБМК на Ленинградской АЭС, 1974 г.;
- пуск первого энергоблока Ростовской АЭС, 2001 г.;
- проект «Прорыв» Росатома в части реализации инновационных технологических решений и ускорения внедрения новых методов в атомной энергетике, 2011 г.;
- введение в эксплуатацию плавучей атомной теплоэлектростанции «Академик Ломоносов», 2020 г.;
- строительство наземной АЭС малой мощности в Якутии, ввод в эксплуатацию в 2028 г.;
- строительство уникального энергоблока четвертого поколения с быстрым реактором естественной безопасности БРЕСТ-ОД-300 в Северске, ввод в эксплуатацию в 2030 г.

В настоящее время в России действуют 36 реакторов мощностью 26802 МВт, находятся в стадии строительства 7 реакторов с запланированной мощностью 4903 МВт¹.

Со стороны государства проектами занимается государственная корпорация «Росатом», которая объединяет ряд организаций по проектированию, инжинирингу и строительству АЭС. Примерами частных организаций могут служить учреждение «Наука и

¹ Nuclear Power in Russia. – World Nuclear Association. – 2025. – Режим доступа: <https://world-nuclear.org/Information-Library/Country-Profiles/Countries-O-S/Russia-Nuclear-Power> (дата обращения: 09.08.2025).

инновации» и НИЦ «Курчатовский институт». Их роль ограничена, поскольку государство сохраняет контроль над ключевыми процессами и технологиями атомной энергетики.

Действующим национальным проектом является «Новые атомные и энергетические технологии», имеющий целью обеспечение мирового лидерства в атомных технологиях и технологический суверенитет в новых энергетических технологиях. Реализация проекта предусматривает к 2030 г. достижение следующих ключевых показателей²:

- количество стран глобального присутствия России на международном рынке атомных и смежных технологий – 75 ед.;
- уровень технологической независимости

в области создания новых атомных технологий – min 67%, max 81%;

- уровень технологической независимости в ТЭК – 90%;

- доля отечественного оборудования в ТЭК – 90%;

- объем производства отечественного оборудования в ТЭК – 2719 млрд. рублей;

- количество созданных технологий – min 42%, max 82%;

- финансирование проекта, всего – min 1157,6 млрд рублей, max 1438,8 млрд. рублей, в том числе из средств федерального бюджета – min 190,5 млрд. рублей, max 421,0 млрд рублей [13, с. 5].

Национальный проект предусматривает реализацию федеральных проектов в сфере ядерной энергетики (см. табл. 1).

Таблица 1. Федеральные проекты в сфере ядерной энергетики в рамках национального проекта «Новые атомные и энергетические технологии» (составлено авторами по [13, с. 11; 14, с. 20], и по материалам открытых источников^{3,4,5})

Table 1. Federal projects in the field of nuclear energy within the framework of the national project «New Nuclear and Energy Technologies» (compiled by the authors according to [13, p. 11; 14, p. 20] and based on open-source materials^{3,4,5})

Федеральный проект	Цель	Целевые показатели
Новая атомная энергетика, в том числе малые атомные реакторы для удаленных территорий (U1)	Разработка технологий замкнутого ядерного топливного цикла и энергоблоков нового поколения	Объем экспорта ядерного топлива 1,6 млрд. долларов США к 2024 г. Доля мирового рынка ядерного топлива 6-8% к 2025 г. 8–10% к 2027 г. Степень готовности объектов капитального строительства 100% к 2030 г. Экономия минерально-сырьевой базы урана ⁶ Объем внебюджетных источников финансирования 23,8 млрд рублей к 2025 г.
Экспериментально-стендовая база для разработки технологий двухкомпонентной атомной энергетики (U2)	Развитие инфраструктуры для испытаний новых технологий и материалов	Степень технологической готовности объектов капитального строительства, завершаемых строительством после 2024 г. 100% к 2030 г. Количество разработанных проектов: не менее 11 новых материалов и 6 образцов новой техники к 2024 г. Количество завершенных строительством, реконструированных и технически перевооруженных объектов ⁶ Количество созданных (сохраненных) рабочих мест ⁶

² Национальный проект «Новые атомные и энергетические технологии». – Правительство России [официальный сайт]. – 2025. – Режим доступа: <http://government.ru/rugovclassifier/929/about/> (дата обращения: 05.08.2025).

³ Приказ Росстата от 28.02.2025 № 103 «Об утверждении методики расчета показателя «Уровень технологической независимости в области создания новых атомных технологий (технологии поколения «4» и управляемого термоядерного синтеза)» национального проекта по обеспечению технологического лидерства «Новые атомные и энергетические технологии». – КонсультантПлюс. – 2025. – Режим доступа: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-rosstata-ot-28022025-n-103-ob-utverzhdenii-metodiki/> (дата обращения: 16.08.2025).

⁴ Кабмин заложил 21 млрд руб. на проект «Новая атомная энергетика» в трехлетнем бюджете. – Интерфакс. – 2023. – Режим доступа: <https://www.interfax.ru/business/922550> (дата обращения 11.08.2025).

⁵ Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года. – Правительство России [официальный сайт]. – 2025. – Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/LWYfSENa10uBrrBoyLQqAAOj5eJY1A60.pdf> (дата обращения: 12.08.2025).

⁶ Информация о величине показателя и сроках недоступна.

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

Технологии термоядерной энергетики (U3)	Создание технологий для получения экологически чистого источника энергии	Вывод на рабочие режимы установки мирового уровня тороидальной магнитной ловушки (токамак) Т-15МД к 2027 г. Создание конструкторской документации для токамака с реакторными технологиями (ТРТ) к 2027 г. Создание стеновой базы управляемого термоядерного синтеза к 2030 г. Готовность ключевых компонент и систем ТРТ к 2030 г. Пуск токамака ТРТ к 2035 г.
Специальные материалы и технологии атомной энергетики (U4)	Развитие новых технологий и достижение мирового лидерства по переработке высокоактивных отходов	Повышение энергонапряженности оборудования: температура до 750 °С, давление до 250 МПа, повышение КПД до 44%, снижение веса оборудования не менее 20% к 2035 г. Создание технологии утилизации минорных актинидов с объемом переработки 250 кг в год и сокращение сроков достижения радиационной эквивалентности на 3 порядка к 2035 г. Создание технологии получения сверхтяжелых элементов и ввод комплекса для разделения изотопов-мишеней для синтеза к 2027 г. Количество привлеченных квалифицированных кадров 30 тыс. чел. к 2030 г.
Серийная референентность атомных электростанций большой и малой мощности (U5)	Создание и выпуск новых блоков АЭС большой мощности	Уровень технологической независимости в области создания новых атомных технологий 100% к 2036 г. Увеличение доли ядерной энергии до 25% в общем энергетическом балансе страны к 2045 г.

Развитие атомной энергетики предусмотрено и в других национальных проектах РФ. Так, в рамках проекта «Экология» запланированы меры по обеспечению безопасности ядерных объектов и программы по утилизации радиоактивных отходов, а проект «Наука» включает исследования и разработ-

ки в области ядерной энергетики, создание новых технологий и материалов, а также поддержку научных исследований и образования в этой сфере.

Выполнение отдельных целевых показателей проекта представлено в таблице 2.

Таблица 2. Выполнение отдельных целевых показателей национального проекта «Новые атомные и энергетические технологии» в сфере атомной энергетики (составлено авторами по материалам открытых источников⁷)

Table 2. Implementation of individual targets of the national project «New Atomic and Energy Technologies» in the field of nuclear energy (compiled by the authors based on open sources⁷)

Показатель	2021 год	2022 год	2023 год	2024 год	2025 год (январь-июнь)
Степень готовности объектов капитального строительства, процентов	н/д	36,87	53,18	81,49	81,49
Объем внебюджетных источников финансирования, миллиардов рублей	н/д	н/д	94, 662	155, 988	155, 988
Доля мирового рынка ядерного топлива, процентов	н/д	17	17	18	19
Объем экспорта ядерного топлива, миллиард долларов США	н/д	1,86	3,35	5,12	5,12
Количество созданных (сохраненных) рабочих мест, единиц	н/д	н/д	н/д	475	475

⁷ ЕМИСС. – Федеральная служба государственной статистики. – 2025. – Режим доступа: <https://www.fedstat.ru/indicators/search?searchText=атомная+энергетика> (дата обращения: 11.08.2025).

Продолжение таблицы 2
 Table 2 continued

Количество созданных ключевых технологий, единиц	н/д	н/д	н/д	н/д	2
Количество разработанных проектов новых реакторных и технологических систем, единиц	1	н/д	н/д	н/д	н/д
Степень технологической готовности объектов капитального строительства, процентов	20,58	н/д	н/д	н/д	н/д

Практически по всем показателям наблюдается выполнение и даже перевыполнение плановых значений. При целевом значении объема внебюджетных источников финансирования, направленных на реализацию проекта U1 в 23,8 млрд. рублей, фактическая величина показателя на июнь 2025 г. составляет 155,988 млрд. рублей. Показатель «Степень готовности объектов капитального строительства» приближается к плановому значению в 100%.

Перспективные задачи отражены в Энергетической стратегии РФ до 2050 г.:

- повышение экономической эффективности функционирования АЭС;
- обеспечение маневренных характеристик АЭС;
- создание линейки энергоблоков АЭС малой и средней мощности, в том числе на удаленных и труднодоступных территориях;
- разработка и внедрение технологий реакторов на быстрых нейтронах и замкнутого ядерного топливного цикла⁵.

Опыт Китайской народной республики

Развитие атомной энергетики в Китае обусловлено необходимостью снижения загрязнения воздуха от угольных электростанций, соблюдением обязательств по защите климата и обеспечению устойчивой энергетической безопасности. В 1958 г. в проекте 12-летнего плана развития науки и техники развитие ядерной энергетики названо главным приоритетным проектом КНР. 1970-ый г. характеризуется началом строительства атомных электростанций. К 2005 г. отрасль вошла в фазу быстрого развития в основном с заимствованием технологий из Франции, Канады и России. В 2011 г. Национальное энергетическое управление заявило о переходе к устойчивому развитию и сообщило, что в ближайшие 10–20 лет Китай сделает ядерную энер-

гетику основой своей системы производства электроэнергии. Это получило свое развитие в 12-ой и 13-ой пятилетках, где разработка национальных проектов была направлена на совершенствование инфраструктуры, строительство демонстрационных реакторов, новых прибрежных электростанций и перерабатывающих заводов, укрепление топливного обеспечения. В материалах 14-го пятилетнего плана 2021 г. отмечено, что Китай занимает лидирующие позиции в мире по темпам развития атомной энергетики и стремится к мировому лидерству в области технологий. К числу наиболее значимых проектов можно отнести следующие:

- ввод в эксплуатацию первого исследовательского реактора, 1958 г.;
- ввод в эксплуатацию первой в стране АЭС «Циньшань», спроектированной и построенной собственными силами, 1991 г.;
- ввод в эксплуатацию АЭС «Линьао», 2002 г.;
- ввод в эксплуатацию АЭС «Хунъяньхэ», 2013 г., достигшей в 2021 г. рекордного в стране уровня мощности;
- ввод в эксплуатацию АЭС «Шидаовань» с ядерными реакторами четвертого поколения HTR-PM, 2021 г.;
- строительство Тяньваньской АЭС как примера крупнейшего гражданского российско-китайского сотрудничества, ввод в эксплуатацию в 2027 г.

В настоящее время в Китае действует 58 реакторов мощностью 56930 МВт, 32 реактора мощностью 34235 МВт находятся на стадии строительства. По данным Всемирной ядерной ассоциации ни один реактор со времени их сооружения не был остановлен⁸.

⁸ Nuclear Power in China. – World Nuclear Association. – 2025. – Режим доступа: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power> (дата обращения: 08.08.2025).

Атомная энергетическая отрасль в стране полностью контролируется государством, включая надзорные и регулирующие органы. В этой сфере работают две крупные компании – Китайская национальная ядерная корпорация и Китайская генеральная группа атомной энергии. Национальные проекты носят форму планов, программ и отдельных проектов, разрабатываемых Китайским управлением по атомной энергии и Государственным комитетом по делам развития и реформ, и одобряемых Госсоветом КНР.

Сейчас в стране действует комплексная «Ядерная программа КНР», охватывающая как мирную, так и в военную сферы с объемом финансирования строительства АЭС

более 440 млрд. долларов. Ключевые показатели программы:

- увеличение мощности АЭС до 200 ГВт к 2030 г., до 400-500 ГВт к 2050 г.;
- строительство до 30 ядерных энергетических реакторов в странах, участвующих в инициативе «Один пояс, один путь» к 2030 г.;
- достижение мощности реакторов на быстрых нейтронах 1400 ГВт к 2100 г.;
- обеспечение годового потребления электроэнергии на душу населения 5500 кВт·ч к 2030 г., 8500 кВт·ч к 2050 году;
- обеспечение 10% электроэнергии АЭС к 2030 г., 15% – к 2050 году⁹.

Наиболее крупные проекты представлены в таблице 3.

Таблица 3. Действующие национальные проекты КНР в сфере атомной энергетики (составлено авторами по [15] и по материалам открытых источников^{9,10,11})

Table 3. Current national projects of the PRC in the field of nuclear energy (compiled by the authors based according to [15] and on open sources^{9,10,11})

Проект/план/программа	Цель	Целевые показатели
Содействие развитию индустрии применения ядерных технологий	Создание базы для дальнейших инновационных производств в различных отраслях	Увеличение годового объема прямых производств до 400 млрд. юаней к 2026 г.
Строительство 11 новых реакторов на 5 АЭС	Формирование новой чистой, низкоуглеродной, безопасной и эффективной энергетической системы и достижение углеродной нейтральности к 2060 г.	Установленная мощность АЭС 70 ГВт к 2026 г. и 120 ГВт к 2030 г.
Строительство 10 новых АЭС		Увеличение доли выработки электроэнергии на АЭС до 10% к 2035 г.
Строительство уранодобывающего комплекса	Обеспечение атомной энергетики сырьем	Обеспечение 55 атомных блоков общей мощностью 57,03 ГВт ¹²
Разработка гибридной термоядерной электростанции	Мировое лидерство в области термоядерной энергетики	Коэффициент усиления энергии Q > 10 к 2040 г. Выработка 100 МВт электроэнергии к 2040 г.
Внедрение технологий в области установок на быстрых нейтронах	Достижение углеродной нейтральности к 2060 г.	Доля атомной энергетики в структуре энергетики страны 100% к 2035 г. Мощность атомного парка страны 400 гигаватт к 2060 г.

⁹ В Китае началось строительство крупнейшего уранодобывающего комплекса. – Страна Росатом. – 2024. – Режим доступа: <https://strana-rosatom.ru/2024/07/25/legkaya-dobycha-v-kitae-nachalos-stroi/?ysclid=mdzt0vjdir566203880> (дата обращения: 06.08.2025).

¹⁰ Китай планирует стать крупнейшим в мире «атомным парком». – Международное информационное агентство Казинформ. – 2024. – Режим доступа: <https://www.inform.kz/ru/kitay-planiruet-stat-krupneyshim-v-mire-atomnim-parkom-d38d7f> (дата обращения: 06.08.2025)

¹¹ Китай запустит первую гибридную термоядерную станцию «Синьхо» с рекордным коэффициентом усиления к 2030 году. – IXBT.com. – 2025. – Режим доступа: <https://www.ixbt.com/news/2025/03/28/kitay-zapustit-pervuju-gibridnuju-termojadernuju-stanciju-sinho-s-rekordnym-koefitsientom-usilenija-k-2030-godu.html> (дата обращения: 06.08.2025).

¹² Данные о сроках, плановом объеме производства, сроке эксплуатации и запасах рудника недоступны.

Степень выполнения планов в Китае можно охарактеризовать как прогрессирующую устойчивую динамику. Однако, по мнению некоторых экспертов, с учетом замедления экономического роста КНР и сокращения притока иностранных инвестиций, следует ожидать, что Китай реализует лишь часть намеченных целей¹³. На ближайшие пять лет Правительство страны наметило относительно небольшой рост, где основными стратегическими целями являются:

- достижение углеродной нейтральности;
- строительство новых АЭС;
- национализация атомных технологий;
- переход к новым поколениям реакторов;
- экспорт технологий;
- создание предприятий с применением ядерных технологий^{14,15}.

Опыт Республики Индия

Необходимость расширения ядерной энергетики в Индии как стране с быстро развивающейся экономикой, ограниченной инфраструктурой и дефицитом электроэнергии обусловлена высоким уровнем карбонизации отраслей и сильным загрязнением окружающей среды. Первые ядерные проекты, направленные на исследовательские цели и обучение кадров, начали появляться в 1960-х гг., в этот же период были запущены проекты по строительству маломощных исследовательских реакторов. Гражданское направление получило свое развитие в 1970-х гг. под давлением международного сообщества. Вплоть до 1990-х гг. основным вектором было развитие инфраструктуры по исследовательским реакторам и подготовка площадок для крупноблоковых АЭС. 1990-е гг. характеризуются расширением ядерной энергетики, проведением

переговоров о сотрудничестве с США, Россией/Советским Союзом, Францией, Канадой, Британией и другими странами. Разработка и реализация крупномасштабных проектов начинается в 2000-х гг.: вводятся новые реакторы, развиваются проекты по обогащению топлива, управлению отходами, внедрению современных методов безопасности. Позже реализуются проекты по развитию тепловых и инерционных реакторов, повышению устойчивости энергосистем, улучшению систем безопасности, развитию обслуживания АЭС. Современные национальные проекты направлены на развитие собственной цепочки создания ядерной энергетики, обеспечение энергонезависимости, повышение безопасности, подготовку кадров, развитие промышленной базы вокруг атомной энергетики, взаимодействие с международными партнерами.

К наиболее крупным проектам относятся:

- сооружение первого исследовательского ядерного реактора «Апсара», 1957 г.;
- ввод в эксплуатацию завода по переработке облученного ядерного топлива, Тромбей, штат Махараштра, 1964 г.;
- запуск в эксплуатацию первой АЭС, Тарапур, штат Махараштра, 1969 г.;
- запуск исследовательского реактора Kamini, использующего в качестве топлива уран, полученный при облучении оксида тория, 1996 г.;
- запуск первого тяжеловодного реактора в составе АЭС «Раджастан», 1972 г.;
- ввод в эксплуатацию АЭС «Куданкулам» с легководными реакторами, 2014 г.;
- ввод в эксплуатацию АЭС «Джайтапур», 2025 г.;
- проектирование исследовательского натриевого реактора FBTR-2, ввод в эксплуатацию в 2040 г.

Сейчас в Индии действует 24 реактора мощностью 7943 МВт, 6 реакторов мощностью 4768 МВт находятся на стадии строительства¹⁶.

¹³ Китай на пути к лидерству в атомной энергетике мира. – Информационно-аналитический центр Heartland. – 2025. – Режим доступа: <https://heartland.asia/china-nuclear-energy/> (дата обращения: 12.08.2025).

¹⁴ Китайское замыкание. – Вестник Атомпрома. – Режим доступа: <https://atomvestnik.ru/2025/07/27/kitajskoe-zamykanie/> (дата обращения: 12.08.2025).

¹⁵ Развитие атомных технологий в Китае. – EnterChina. – 2024. – Режим доступа: <https://enterchina.ru/blog/razvitie-atomnyh-tehnologij-v-kitae/> (дата обращения: 12.08.2025).

¹⁶ Nuclear Power in India. – World Nuclear Association. – 2025. – Режим доступа: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/india> (дата обращения: 08.08.2025).

Правом на производство и управление ядерной энергией обладает государство. Основным органом является Индийская комиссия по атомной энергии. Операторами всех АЭС являются Индийская корпорация по атомной энергии, которая отвечает за проектирование, строительство, ввод в эксплуатацию и обслуживание, и Bharatiya Nabhikiya Vidyut Nigam Ltd. Частные компании могут участвовать в развитии ядерной энергетики, но в рамках определенных ограничений. Например, им разрешено приобретать земельные участки и возводить различные объекты на территории атомных станций, за исключением энергоблоков.

В настоящее время в стране действует долгосрочная комплексная государственная программа «Атомная энергия для мирного использования» с периодом действия до

2047 г. Основными целями являются обеспечение устойчивого и безопасного электричества за счет использования ядерной энергии, снижение зависимости от ископаемого топлива и снижение выбросов углерода. Реализация программы предусматривает достижение следующих ключевых показателей:

- увеличение атомных мощностей в три раза к 2032 г.;
- достижение общей установленной мощности АЭС 22,5 ГВт к 2031–2032 гг.;
- достижение мощности атомной энергетики страны 100 ГВт к 2047 г.;
- обеспечение нулевого уровня выбросов углекислого газа к 2070 г.

Национальные проекты, входящие в состав программы, представлены в таблице 4.

Таблица 4. Действующие национальные проекты Индии в сфере атомной энергетики (составлено авторами по материалам открытых источников^{17,18,19})

Table 4. India's current national projects in the field of nuclear energy (compiled by the authors based on open source materials^{17,18,19})

Проект	Цель	Целевые показатели
Строительство 8, в том числе малых, реакторов на 4 АЭС	Расширение бесперебойности обеспечения энергией экономики и населения регионов	Общая генерирующая мощность 6800 МВт к 2025–2031 гг.
Строительство 2 энергоблоков		Общая генерирующая мощность 1400 МВт к 2028–2029 гг.
Строительство 10 автономных реакторов (подготовительные мероприятия)		Общая генерирующая мощность 7000 МВт к 2025–2034 гг.
Строительство АЭС	Децентрализованная генерация и удовлетворение региональных нужд в электроэнергии	Общая мощность 10 380 МВт. Начало строительства – 2025 г. Дата ввода в эксплуатацию – н/д
Площадка по переработке топлива (исследовательский этап)	Расширение ядерной инфраструктуры и минимизация радиационной опасности	Нет данных
Инновационные исследования и разработки в области безопасного проектирования	Развитие новых технологий безопасности, материалов и систем управления	Постоянно

Несмотря на достигнутые успехи, развитие атомной энергетики в Индии давно сталкивается с трудностями в виде санкций западных стран, высоких капитальных затрат,

проблемам с проектированием и контролем качества. В итоге по состоянию на 2024 г. объемы производства атомной энергии составили 7,4 ГВт при плановом значении 8 ГВт²⁰.

¹⁷ Home: Nuclear Power Corporation of India Limited. – 2025. – Режим доступа: <https://www.npcil.nic.in/index.aspx> (дата обращения: 08.08.2025).

¹⁸ Homepage: Ministry of new and renewable energy. – India. – 2025. – Режим доступа: <https://mnre.gov.in/en/> (дата обращения: 08.08.2025).

¹⁹ Nuclear Physics Home, SINP, DAE, GOI. – 2025. – Режим доступа: <https://www.saha.ac.in/web/npd-home> (дата обращения: 08.08.2025).

²⁰ Как залежи тория помогут Индии развить атомную энергетику. – РБК – Отрасли. – 2025. – Режим доступа: <https://www.rbc.ru/industries/news/67af4bd49a79475fc88e3368> (дата обращения: 08.08.2025).

Основные направления предусмотрены в «Долгосрочной стратегии низкоуглеродного развития»:

- увеличение мощностей ядерной энергетики;
- изучение возможности развертывания малых модульных ядерных реакторов;
- повышение энергобезопасности и стабильности цепи поставок;
- создание благоприятных условий для привлечения инвестиций;

- диверсификация энергетического портфеля;
- достижение климатических целей²¹.

Сравнение опыта стран в разработке и реализации национальных проектов в сфере атомной энергетики

Анализ объемов ядерной энергетической мощности стран показывает значительные различия в динамике развития и масштабах ядерной энергетики (рис. 1).

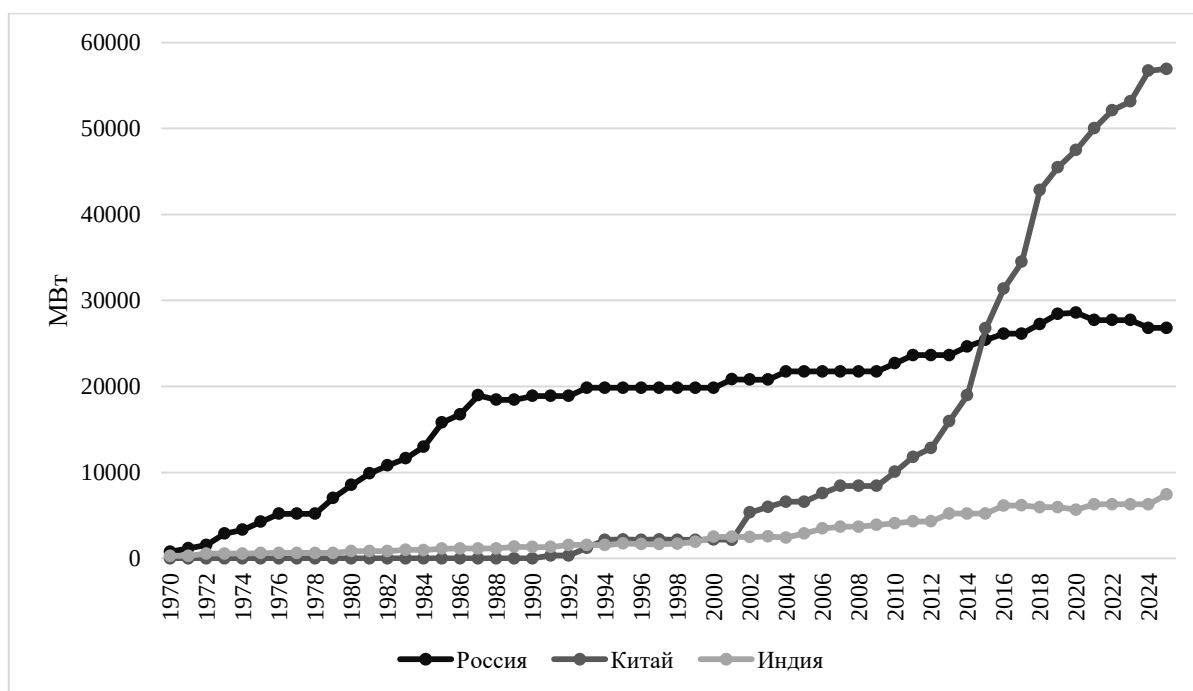


Рисунок 1. Действующая ядерная энергетическая мощность АЭС. Составлено авторами по материалам открытых источников²²

Figure 1. The current nuclear power plant capacity. Compiled by the authors based on materials from open sources²²

Китай характеризуется наиболее высокими темпами развития по сравнению с другими странами. Как утверждают, КНР строит реакторы более чем в 2,5 раза быстрее, чем любая другая страна, со средним сроком строительства около семи лет²³. По данным на июнь 2025 г., совокупные ядерные мощности Китая по отношению к уровню 1991 г.

увеличились почти в 175 раз и составили 56930 МВт; мощности Индии выросли с 1324 до 7438 МВт или в 5,62 раза, России – с 18898 до 26802 МВт или в 1,42 раза.

Сравнение проектной деятельности России, Китая и Индии по ключевым аспектам приведено в таблице 5.

²¹ India India's Long-Term Low-Carbon Development Strategy. – United Nations. Climate Changes. –2022. Режим доступа: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/India_LTLEDS.pdf (дата обращения: 12.08.2025).

²² Information Library. – World Nuclear Association. – 2025. – Режим доступа: <https://world-nuclear.org/information-library> (дата обращения: 08.08.2025).

²³ СМИ указали на отставание США от Китая в сфере атомной энергетики на 15 лет. – Известия. – 2024. – Режим доступа: <https://iz.ru/1713512/2024-06-17/smi-ukazali-na-otstavanie-ssha-ot-kitaia-v-sfere-atomnoi-energetiki-na-15-let> (дата обращения: 12.08.2025).

Таблица 5. Сравнение проектной деятельности России, Китая и Индии в сфере атомной энергетики по ключевым аспектам (составлено авторами)**Table 5.** Comparison of the project activities of Russia, China and India in the field of nuclear energy by key aspects (compiled by the authors)

Ключевые аспекты	Россия	Китай	Индия
Общая характеристика	Продолжительная история строительства и эксплуатации атомной энергетики, крупные государственные и экспортные проекты	Стратегическое планирование на долгий срок, масштабная модернизация энергетической структуры	Упор на баланс между внутренними ресурсами, импортируемыми технологиями и инфраструктурной доступностью
Позиция в мировом пространстве	Сохранение роли ключевого поставщика технологий и сервисов	Лидерство по темпам роста и масштабам новых проектов	Сосредоточение на диверсификации, локализации, создании устойчивой регуляторной и финансовой основы
Приоритеты	Развитие реакторной мощности в рамках экспортных проектов	Наращивание доли атомной энергетики в энергобалансе	Ускорение строительства реакторов
Финансирование	Государственные программы, госгарантии, экспортные кредиты, участие в проектах за рубежом через госкорпорации и банки.	Госфинансирование, банковские кредиты, сотрудничество с промышленными партнерами	Госфинансирование, госбанки, совместные предприятия с иностранными партнерами, лизинговые и кредитные схемы
Используемые технологии	Водно-водяные (ВВЭР) реакторы. Модульный подход в рамках крупных проектов с основной долей строительства по традиционным сериям	Смешанная линейка: крупные ВВЭР-проекты и развивающиеся малые модульные решения (SMR). Высокий акцент на модульные решения	ВВЭР и другие реакторы, активная работа над SMR и локализацией технологических цепочек
Международное сотрудничество	Ряд стран на внешних проектах и экспорт атомной техники	Ряд стран в строительстве АЭС за рубежом, развитие международной инфраструктуры	С несколькими странами через соглашения с Россией, Францией и США
Экспортный потенциал	Высокий за счет существующих связей и технологических возможностей, включая долгосрочные контракты на поставки оборудования и сервисное обслуживание	Ведущее место в лидерах по экспорту технологий и компетенциям	На стадии развития; в перспективе участие в международных проектах и поставках оборудования
Основные вызовы	Санкции, цены на нефть и газ, поставки оборудования, геополитическая неопределенность	Безопасность поставок топлива, утилизация радиационных отходов, финансирование проектов на фоне роста долгов	Дефицит финансирования, развитие инфраструктуры, безопасное обращение с отходами, локализация производства

Все страны – Россия, Китай и Индия – рассматривают атомную энергетику как средство обеспечения базовой мощности, энергетической независимости и снижения выбросов. Ключевыми факторами для стран остаются финансирование и государственный контроль. Но если для России и Китая ведущая роль отведена сильному государственному участию и координации через государственные корпорации, то в Индии государственное планирование сочетается

с частной вовлеченностью. Помимо этого, Россия и Китай придают значительное внимание собственным технологическим разработкам и экспорту, тогда как Индия уделяет больше внимания импорту, пытаясь при этом нарастить внутреннее производство и инфраструктуру.

Обобщение опыта России, Китая и Индии позволяет определить ключевые направления политики в сфере ядерной энергетики:

1. Разработка долгосрочной стратегии, подкрепленной дорожной картой.

2. Обеспечение координации между министерствами, регуляторами, представителями отраслей и финансовыми институтами.

3. Развитие технологического потенциала путем модернизации существующих реакторов.

4. Развитие инновационного потенциала путем поддержки научно-исследовательских программ.

5. Развитие экспортного потенциала путем участия в международных проектах.

6. Снижение зависимости от внешних поставщиков и повышение устойчивости цепочек поставок путем формирования кластеров и кооперационных связей.

7. Поддержка программы подготовки кадров путем предоставления образовательных кредитов, повышения квалификации, сертификации специалистов.

8. Повышение безопасности путем усиления регуляторного надзора, проведения мониторинга, управления рисками, развития систем аварийного реагирования.

9. Разработка финансовых инструментов поддержки проектов.

10. Развитие международного сотрудничества.

11. Повышение экологической устойчивости и минимизация экологических рисков.

12. Развитие социальной поддержки и положительного восприятия со стороны общества.

Реализация названных направлений ускорит модернизацию процессов, улучшит управление ресурсами, повысит эффективность проектов, что позволит обеспечить устойчивый рост энергетической отрасли

стран, усилит энергетическую безопасность и конкурентоспособность на мировом рынке атомной энергетики.

Выводы

Таким образом, Россия, Китай и Индия одинаково признают важность ядерной энергетики как элемента энергетической безопасности и декарбонизации. Ключевыми факторами успеха развития проектной деятельности в каждой стране являются эффективное лицензирование и регуляторная ясность, устойчивое финансирование, развитие цепочек поставок, кадровый потенциал, а также управляемые риски строительства и эксплуатации АЭС. При этом такие факторы, как уровень государственной поддержки и финансирования, жесткость регуляторной среды, социальная приемлемость проектов, экологические и климатические условия определяют особенности развития проектов в атомной энергетике в различных странах.

Результаты исследования позволили выявить и сравнить особенности проектной деятельности в атомной энергетике в Российской Федерации, Китайской народной республике и Республике Индия, разработать общие направления политики в сфере ядерной энергетики. Тем не менее, требуется постоянная актуализация представленной информации, обусловленная активным развитием ядерной энергетики не только в названных странах, но и во всем мире. Также представляют интерес вопросы международного сотрудничества, направленного на повышение безопасности, снижение рисков и повышение доверия к атомной энергетике на глобальном уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Чжан Т., Кашбразиев Р.В. Российско-китайское сотрудничество в энергетической сфере в XXI веке. *Прогрессивная экономика*. 2022(2):5–22. https://doi.org/10.54861/27131211_2022_2_5
Zhang T., Kashbraziev R.V. Russian-Chinese cooperation in the energy sector in the 21st century. *Progressive economy*. 2022(2):5–22. https://doi.org/10.54861/27131211_2022_2_5
2. Kai M. Economic cooperation between Russia and China in the investment sphere. *Review of Business and Economic Studies*. 2022; 10(4):24–35. <https://doi.org/10.26794/2308-944X-2022-10-4-24-35>
3. Винокурова А.Е. Международно-правовое регулирование сотрудничества России и Индии в области мирного использования атомной энергии. *Научное обозрение. Серия 1: Экономика и право*. 2022(1):97–111. <https://doi.org/10.26653/2076-4650-2022-1-07>

Vinokurova A.E. International legal regulation of cooperation between Russia and India in the field of peaceful uses of atomic energy. *Scientific review. Series 1: Economics and Law*. 2022(1):97–111. (in Russ.). <https://doi.org/10.26653/2076-4650-2022-1-07>

4. Савина Н., Грозыкин М. Российско-китайское сотрудничество в сфере энергетической и экономической безопасности. *Московский экономический журнал*. 2024;9(10):230–255. https://doi.org/10.55186/2413046X_2024_9_10_409

Savina N., Grozykin M. Russian-Chinese cooperation in the field of energy and economic security. *Moscow Economic Journal*. 2024; 9(10):230–255. (in Russ.). https://doi.org/10.55186/2413046X_2024_9_10_409

5. Савельева Н.К., Созинова А.А., Фокина О.В. Приоритеты инновационной проектной деятельности в топливно-энергетическом комплексе России. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(3):87–100. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-08>

Savelyeva N.K., Sozinova A.A., Fokina O.V. Priorities of innovative project activity in the fuel and energy complex of Russia. *Global nuclear safety*. 2024;14(3):87–100. (in Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-08>

6. Huria S. The unsustainability of India's nuclear energy policy: resisting the Gorakhpur nuclear project. In book: *The Nuclear-Water Nexus*. Stogcolm: Royal Institute of Technology, 2025. P. 97–108. <https://doi.org/10.7551/mitpress/15572.003.0013>

7. Горин Н.В., Екидин А.А., Головихина О.С. Атомная энергетика в национальных проектах России. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2021;(1):5–15. <https://doi.org/10.26583/npe.2021.1.01>

Gorin N.V., Yekidin A.A., Golovikhina O.S. Nuclear power engineering in Russia's national projects. *News of higher educational institutions. Nuclear power engineering*. 2021;(1):5–15. (in Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2021.1.01>

8. Галковская В.Е. Оценка перспектив финансирования атомных электростанций. *Вестник Академии знаний*. 2020;41(6):75–83. <https://doi.org/10.24412/2304-6139-2020-10764>

Galkovskaya V.E. Assessment of the prospects for financing nuclear power plants. *Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2020;41(6):75–83. (in Russ.). <https://doi.org/10.24412/2304-6139-2020-10764>

9. Савчина О.В., Баев Н.Г. Анализ финансирования проектов устойчивого развития энергетических компаний РФ в условиях макроэкономической нестабильности. *Инновации и инвестиции*. 2024(6):230–235. Режим доступа: <https://innovazia.ru/upload/iblock/6c6/0rgwku6tkekx44b9cn6v0wpkdilmpgha/%E2%84%966%202024%20%D0%98%D0%B8%D0%98.pdf> (дата обращения: 12.08.2025).

Savchina O.V., Baev N.G. Analysis of financing projects for sustainable development of energy companies of the Russian Federation in the context of macroeconomic instability. *Innovation and investment*. 2024(6):230–235. (in Russ.). Available at: <https://innovazia.ru/upload/iblock/6c6/0rgwku6tkekx44b9cn6v0wpkdilmpgha/%E2%84%966%202024%20%D0%98%D0%B8%D0%98.pdf> (accessed: 12.08.2025).

10. Lucet F.P. Conditions and possibilities for financing new nuclear power plants. *The Journal of World Energy Law & Business*. 2019;12(1):21–35. <https://doi.org/10.1093/jwelb/jwy032>

11. Тоноян А.С. Особенности формирования проектной команды на объектах атомной энергетики. *Риск: ресурсы, информация, снабжение, конкуренция*. 2023;(4):93–96. Режим доступа: <https://ojs.risk-online.ru/archive/2023/04/> (дата обращения: 12.08.2025).

Tonoyan A.S. Features of the formation of a project team at nuclear power facilities. *Risk: resources, information, supply, competition*. 2023;(4):93–96. (in Russ.). Available at: <https://ojs.risk-online.ru/archive/2023/04/> (accessed: 12.08.2025).

12. Gebremichael D.D., Lee Y., Yim J., Jung Y. Safety information requirements for nuclear power plant (npp): from a project management perspective. Conference: Proceedings of the 22nd International Conference on Construction Applications of Virtual Reality. Chung-Ang University. South Korea. November 16-18, 2022. P. 554–561. Available at: https://www.researchgate.net/publication/370102789_SAFETY_INFORMATION_REQUIREMENTS_FOR_NUCLEAR_POWER_PLANT_NPP_FROM_A_PROJECT_MANAGEMENT_PERSPECTIVE (accessed: 12.08.2025).

13. Ильина Н.А. Цифровые решения для управления Федеральными проектами технологического лидерства атомной энергетики. Материалы VI научно-практической конференции СРО атомной отрасли «АтомСтройСтандарт-2025» Цифровые технологии – ключевой фактор развития проектно-строительного комплекса атомной отрасли в период 2025-2030 гг. 3 апреля 2025 года. Москва: АтомСтройСтандарт, 2025. 15 с. Режим доступа: <https://www.atomic-energy.ru/video/158113?ysclid=mf4924uzz1998083641> (дата обращения: 12.08.2025).

Ilyina N.A. Digital solutions for the management of Federal projects of technological leadership of nuclear energy. Materials of the VI scientific and practical conference of the SRO of the nuclear industry «AtomStroyStandart-2025». Digital technologies are a key factor in the development of the design and construction complex of the nuclear industry in the period 2025-2030. Moscow. AtomStroyStandart. April 23, 2025. 15 p. (in Russ.). Available at: <https://www.atomic-energy.ru/video/158113?ysclid=mf4924uzz1998083641> (accessed: 12.08.2025).

14. Аникеев А.В. Задачи и перспективы отечественной программы по управляемому термоядерному синтезу. Материалы XVII конференции «Забабахинские научные чтения» 19-23 мая 2025 года, г. Снежинск; ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забахина». 2025. 25 с. Режим доступа: <https://vniitf.ru/data/ZST25/Presentation/Plenary/02.anikeevav.pdf?ysclid=mf493umres129033999> (дата обращения: 12.08.2025).

Anikeev A.V. Tasks and prospects of the national program for controlled thermonuclear fusion. Proceedings of the XVII conference «Zababakhinsky scientific readings» on May 19-23, 2025. Snezhinsk. FSUE «RFNC-VNIITF named after academician E.I. Zababakhin», 2025. 25 p. (in Russ.). Available at: <https://vniitf.ru/data/ZST25/Presentation/Plenary/02.anikeevav.pdf?ysclid=mf493umres129033999> (accessed: 12.08.2025).

15. Вороновский И.Б., Ашмарина Т.И., Цзян Ч., Сяо Я. Перспективы развития атомной отрасли КНР. *Образование и право*. 2023;(12):632–636. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60003506> (дата обращения: 12.08.2025).

Voronovsky I.B., Ashmarina T.I., Jiang Ch., Xiao Ya. Prospects for the development of the nuclear industry in China. *Education and Law*. 2023;(12):632–636. (in Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60003506> (accessed: 12.08.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Фокина О.В. – анализ источников, анализ ключевых показателей национальных проектов в сфере атомной энергетики, составление описания характеристик проектов, проведение сравнения опыта стран в разработке и реализации национальных проектов в сфере атомной энергетики по ключевым аспектам, разработка направлений политики в сфере ядерной энергетики;

Исупов И.В. – анализ источников, подготовка краткого обзора развития проектной деятельности стран, формирование перечня ведущих национальных проектов в отрасли, выявление актуальных национальных проектов, оценка выполнения ключевых показателей национальных проектов.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Ольга Васильевна Фокина, кандидат экономических наук, доцент, заведующая кафедрой менеджмента и маркетинга ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-6697-3353>

e-mail: fokina@vyatsu.ru

Игорь Викторович Исупов, магистрант, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров, Российская Федерация.

e-mail: maximfisher15@gmail.com

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Fokina O.V. – analysis of sources, analysis of key indicators of national projects in the field of nuclear energy, drawing up a description of the characteristics of projects, comparing the experience of countries in the development and implementation of national projects in the field of nuclear energy in key aspects, developing policy directions in the field of nuclear energy;

Isupov I.V. – analysis of sources, preparation of a brief overview of the development of project activities in countries, formation of a list of leading national projects in the industry, identification of relevant national projects, assessment of the implementation of key indicators of national projects.

FUNDING:

The study had no external funding

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Olga V. Fokina, Cand. Sci. (Economics), Associate Professor, Head of the Department of Management and Marketing, Vyatka State University, Kirov, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-6697-3353>

e-mail: fokina@vyatsu.ru

Igor V. Isupov, Undergraduate student, Vyatka State University, Kirov, Russian Federation.

e-mail: maximfisher15@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 19.04.2025

После доработки / Revision 21.08.2025

Принята к публикации / Accepted 27.08.2025

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-2025-03-09>

EDN ZLFQER

Оригинальная статья / Original paper



Анализ динамики травматизма и промышленной безопасности
на уранодобывающем предприятии

М.М. Исаков , Ю.М. Медведева 

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

 m.m.isakov@mail.ru

Аннотация. Безопасность труда на уранодобывающих предприятиях остается одной из ключевых составляющих устойчивого промышленного развития. В условиях высоких рисков, связанных с эксплуатацией месторождений урана методом подземного выщелачивания, особое значение приобретает системный подход к профилактике травматизма и формированию культуры безопасности. Целью настоящего исследования является анализ производственного травматизма в АО «НАК Казатомпром» за период 2019–2024 гг. с оценкой эффективности применяемых инструментов охраны труда, включая внедрение концепции Vision Zero, проведение поведенческих аудитов, использование цифровых решений для мониторинга и активное обучение персонала. Методологической основой послужили данные интегрированных годовых отчетов, показатели LTIFR (Lost Time Injury Frequency Rate), количественный анализ несчастных случаев и динамики их изменения, а также качественная оценка корпоративной культуры безопасности на предприятиях. Результаты анализа свидетельствуют о выраженной положительной динамике: если в 2019 г. было зафиксировано 8 несчастных случаев и LTIFR составлял 0,24, то к 2024 г. эти показатели снизились до 3 случаев и LTIFR 0,09 соответственно. Наиболее критичным оказался 2021 г. (9 случаев, LTIFR – 0,55), после чего с 2022 г. отмечается устойчивое улучшение ситуации. Системные меры, предпринятые компанией, позволили снизить частоту травм более чем в 2,5 раза. Полученные результаты демонстрируют успешность стратегического подхода АО «НАК Казатомпром» в области охраны труда и подтверждают соответствие реализуемых практик международным стандартам. Компания не только снижает производственные риски, но и формирует зрелую культуру безопасности, вовлекая сотрудников в управление рисками. Опыт АО «НАК Казатомпром» может быть рекомендован для тиражирования на других предприятиях отрасли. В дальнейшем целесообразно расширение цифровизации мониторинга, привлечение персонала к инициативам по безопасности и дальнейшее закрепление принципов Vision Zero в корпоративной политике.

Ключевые слова: охрана труда, LTIFR, Vision Zero, промышленная безопасность, уранодобыча, культура безопасности.

Для цитирования: Исаков М.М., Медведева Ю.М. Анализ динамики травматизма и промышленной безопасности на уранодобывающем предприятии. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(3):108–115. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-09>

For citation: Isakov M.M., Medvedeva Yu.M. Analysis of injury and industrial safety dynamics at a uranium mining enterprise. *Nuclear Safety*. 2025;15(3):108–115. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-09>

Analysis of injury and industrial safety dynamics at a uranium mining enterprise

Manas M. Isakov , Yulia M. Medvedeva 

¹National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation

 m.m.isakov@mail.ru

Abstract. Occupational safety at uranium mining enterprises remains one of the key components of sustainable industrial development. In conditions of high risks associated with the operation of uranium deposits using the in-situ leaching method, a systematic approach to accident prevention and the formation of a safety culture becomes particularly important. The objective of this study is to analyze occupational injuries at JSC «NAC Kazatomprom» for the period 2019–2024, with an assessment of the effectiveness of applied occupational safety tools, including the implementation of the Vision Zero concept, behavioral audits, the use of digital monitoring solutions, and active personnel training. The methodological basis consisted of integrated annual reports, LTIFR (Lost Time Injury Frequency Rate) indicators, quantitative analysis of accidents and their trends, as well as qualitative assessment of the corporate safety culture at the enterprises. The results of the analysis indicate a pronounced positive trend: while in 2019 there were 8 accidents and the LTIFR was 0, 24, by 2024 these indicators had decreased to 3 accidents and an LTIFR of 0, 09, respectively. The most critical year was 2021 (9 accidents, LTIFR – 0, 55), after which a steady improvement has been observed since 2022. The systemic measures implemented by the company have reduced the injury frequency by more than 2,5 times. The obtained results demonstrate the success of JSC «NAC Kazatomprom»'s strategic approach to occupational safety and confirm the compliance of implemented practices with international standards. The company not only reduces operational risks but also develops a mature safety culture by engaging employees in risk management. The experience of JSC «NAC Kazatomprom» can be recommended for replication at other enterprises in the industry. In the future, it is advisable to expand digital monitoring, involve personnel in safety initiatives, and further consolidate the principles of Vision Zero in corporate policy.

Keywords: occupational safety, LTIFR, Vision Zero, industrial safety, uranium mining, safety culture.

Введение

В условиях современной промышленности безопасность труда перестала быть просто формальной обязанностью – она стала основой устойчивого развития, особенно для тех отраслей, где риски чрезвычайно высоки. Одной из таких отраслей является уранодобыча. Предприятия, работающие в этой сфере, сталкиваются с целым комплексом производственных, экологических и социальных вызовов, что требует постоянного внимания к вопросам охраны труда и защиты персонала. Уранодобывающие предприятия работают в сложной технологической среде, где малейшая ошибка может повлечь серьезные последствия не только для здоровья работников, но и для окружающей среды. Поэтому сегодня уже недостаточно просто выполнять минимальные требования законодательства – необходимо внедрять системный, проактивный подход к безопасности, ориентированный на предотвращение инцидентов, а не просто на их расследование постфактум [1,2].

АО «НАК Казатомпром» является мировым лидером в добыче природного урана, применяет технологию подземного выщелачивания, которая считается менее травмоопасной и экологически более безопасной по сравнению с традиционными шахтными методами. Однако реализация этой технологии требует строго выверенного управления

всеми производственными процессами: от радиационной защиты и контроля химических реагентов до обеспечения технической надежности оборудования и подготовки персонала. Как отмечается в работе Искакова М.М., Тренина А.В., Кимолаева Ж.Б. и Абулкассимова А.Б., представленной на Международной конференции по радиационной безопасности МАГАТЭ (2020), системы радиационной защиты на уранодобывающих предприятиях, использующих метод ISL, должны быть построены на принципах постоянного мониторинга, оценки доз облучения персонала и управления потенциальными рисками [3]. Подобный подход позволяет минимизировать негативное воздействие на здоровье сотрудников и окружающую среду, а также обеспечить соответствие международным стандартам в области ядерной безопасности.

Как отмечают исследователи в ряде публикаций, в том числе в работе «Разработка моделей решения ключевых проблем стратегического развития уранодобывающего предприятия» [4], одной из приоритетных задач для Казахстана в сфере уранодобычи является усиление требований к охране труда, промышленной безопасности и экологическому контролю. Это полностью соответствует как национальным нормам, так и международным рекомендациям, в том числе стандартам МАГАТЭ и передовым

практикам глобальных атомных компаний. Именно поэтому АО «НАК Казатомпром» придает особое значение формированию зрелой и эффективной системы охраны труда и промышленной безопасности, активно внедряя современные инструменты управления рисками, включая элементы концепции Vision Zero и поведенческие аудиты [5].

Настоящее исследование направлено на оценку эффективности действующей системы обеспечения безопасности труда в АО «НАК Казатомпром» за период 2019–2024. В центре внимания – не просто статистика, а реальные изменения, произошедшие в рамках внедрения концепции Vision Zero, развития культуры безопасности, применения поведенческих аудитов, повышения осведомленности сотрудников и совершенствования механизмов радиационной защиты.

Отдельный акцент сделан на анализ ключевых показателей, в частности LTIFR – частоты травм с потерей трудоспособности, а также динамики числа несчастных случаев [6,7,8,9]. На основе собранных данных рассматривается, насколько внедренные меры оказались результативными, как изменилась корпоративная культура и в какой степени удалось приблизиться к стратегической цели – «ноль травм».

Материалы и методы исследований

В основе исследования лежит анализ информации, представленной в интегрированных годовых отчетах АО «НАК Казатомпром» за 2019–2024 годы. Эти документы содержат как статистические данные, так и аналитические материалы по вопросам охраны труда, промышленной безопасности, радиационного контроля и устойчивого развития, что позволило сформировать всестороннее представление о динамике изменений в системе управления безопасностью на предприятии.

Для повышения надежности и глубины анализа применялся смешанный подход, сочетающий количественные методы такие как:

- анализ показателя частоты травм с потерей трудоспособности (LTIFR);

- качественные методы, в том числе оценка корпоративной культуры безопасности труда.

Такой комплексный подход позволил не только проследить изменения в цифрах, но и понять, какие поведенческие и управленческие трансформации происходили внутри компании.

Ключевым понятием, определившим логику трансформации системы охраны труда, стала концепция Vision Zero [10,11]. Эта международная инициатива, разработанная Международной ассоциацией социального обеспечения (ISSA), исходит из того, что все несчастные случаи можно предотвратить, если грамотно выстроить систему предупреждения рисков. Внедрение принципов Vision Zero в АО «НАК Казатомпром» стало не просто формальной адаптацией зарубежной практики, а стимулом к масштабному пересмотру внутренних процессов: от оценки рисков и планирования мероприятий до формирования новых моделей поведения работников и внедрения цифровых решений. В частности, особое внимание стало уделяться поведенческим аудитам, цифровому мониторингу безопасности и обучению руководителей всех уровней.

Еще одним важным элементом анализа стала оценка корпоративной культуры безопасности труда [12]. Этот аспект изучался через призму модели «Кривой Брэдли», которая описывает четыре стадии зрелости культуры безопасности: от реактивной, при которой действия совершаются только в ответ на инциденты, до взаимозависимой, где каждый сотрудник осознает свою личную ответственность за безопасность как свою, так и коллег. Внедрение Vision Zero усилило стремление компании двигаться именно в направлении взаимозависимого уровня, где безопасность становится органичной частью повседневной производственной культуры. Для этого компания делает акцент на систематическом обучении, мотивации и вовлечении персонала на всех уровнях.

В рамках методологии исследования ключевым показателем, отражающим уровень эффективности системы охраны труда, выступает LTIFR. Этот показатель рассчитывается по международной формуле (1) как

отношение количества несчастных случаев с утратой трудоспособности к общему числу отработанных человеко-часов, нормированное на один миллион человеко-часов:

$$LTIFR = \frac{LTI \cdot 1\,000\,000}{WH}, \quad (1)$$

где LTI – численность пострадавших в результате несчастных случаев;

WH – общее количество отработанных часов;

1 000 000 – нормирующий коэффициент, позволяющий представить показатель на 1 миллион отработанных часов.

Использование LTIFR позволяет объективно сравнивать уровень производственно-

го травматизма не только в динамике внутри компании, но и с аналогичными предприятиями отрасли на национальном и международном уровне.

Результаты и их обсуждение

Анализ производственных показателей за 2019–2024 гг. свидетельствует о четкой положительной динамике в области охраны труда и промышленной безопасности на предприятиях компании. Если в 2019 г. было зарегистрировано 8 несчастных случаев, а показатель LTIFR составлял 0,24, то в последующие годы наметилась устойчивая тенденция к снижению этих значений (рис. 1).

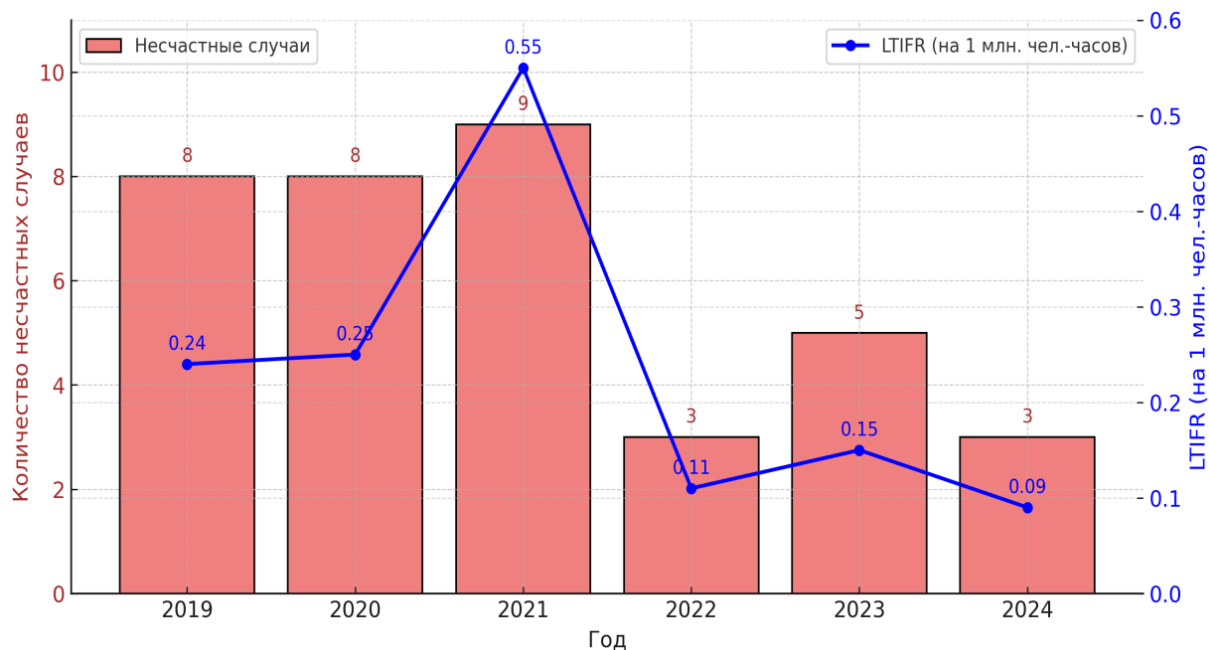


Рисунок 1. Динамика LTIFR в АО «НАК Казатомпром» за 2019–2024 гг.

Figure 1. LTIFR dynamics in NAC Kazatomprom JSC for 2019–2024

Наиболее неблагоприятным оказался 2021 г., когда количество несчастных случаев достигло 9, а LTIFR вырос до 0,55 – это максимальные значения за весь рассматриваемый период. Рост числа несчастных случаев в 2021 г. был обусловлен совокупностью факторов. По данным службы охраны труда и экспертным оценкам, основными причинами стали увеличение объемов буровых и геологоразведочных работ, временные кадровые перестановки, вызванные панде-

мией COVID-19, и рост доли сотрудников с малым стажем. Дополнительное влияние оказали неблагоприятные погодные условия в весенний период, осложнившие проведение работ на открытых площадках.

Однако уже начиная с 2022 г. ситуация начала заметно улучшаться. В 2022 г. число происшествий снизилось до 3, а LTIFR упал до 0,11. В 2023 г. эти показатели незначительно выросли – 5 случаев и LTIFR 0,15, но общий тренд на снижение сохранился¹. Осо-

бенно важно отметить 2024 г.: при сохранении общего масштаба производственной деятельности зарегистрировано всего 3 несчастных случая, а уровень LTIFR достиг минимального значения – 0,09. Это означает, что за шесть лет компании удалось более чем в 2,5 раза снизить частоту травм с потерей рабочего времени. Такие результаты можно считать прямым отражением системной работы по профилактике травматизма, улучшению условий труда и усилению культуры безопасности на всех уровнях управления.

На рисунке 2 представлена динамика коэффициента LTIFR АО «НАК Казатомпром»

в сравнении с данными Росатома и ORANO за 2019-2024 г.г. Анализ показывает, что уровень травматизма у Казатомпрома стабильно остается ниже, чем у рассматриваемых конкурентов. После пикового значения в 2021 г. (0,55) компания продемонстрировала устойчивое снижение показателя до 0,11 в 2022 г., 0,15 в 2023 г. и минимального значения 0,09 в 2024 г. Такая динамика свидетельствует о системной реализации мероприятий Vision Zero, развитии культуры безопасности и внедрении цифровых инструментов мониторинга.



Рисунок 2. Сравнение коэффициента LTIFR для АО «НАК «Казатомпром» Росатома и ORANO за 2019-2024 гг.

Figure 2. Comparison of LTIFR for Rosatom's JSC NAC Kazatomprom and ORANO for 2019-2024

Для сравнения, показатели Росатома в рассматриваемый период колебались в узком диапазоне 0,21–0,24, что соответствует высоким отраслевым стандартам и указывает на стабильную эффективность системы охраны труда. В то же время ORANO, по данным публичных годовых отчетов, продемонстрировала ухудшение ситуации: после относительной стабильности в 2019-2022 гг. LTIFR вырос до 1,20 в 2023 г., что в несколь-

ко раз превышает среднеотраслевые значения, а в 2024 г. снизился лишь до 0,95. Подобная динамика может свидетельствовать о недостаточной результативности профилактических мероприятий и потребности в пересмотре подходов к управлению безопасностью.

Сопоставление с данными МАГАТЭ и отраслевыми отчетами позволяет заключить, что показатели Казатомпрома в 2024 г. (0,09) соответствуют лучшим мировым практикам (0,10–0,15) и превосходят средние значения по отрасли (0,12–0,25). Это подтверждает, что опыт компании может быть использован

¹ Интегрированный годовой отчет за 2019 г. АО «НАК «Казатомпром». – Kazatomprom.kz. – 2020. – Режим доступа: https://www.kazatomprom.kz/storage/18/kazatomprom_ar_2019_ru_full_final.pdf (дата обращения: 15.05.2025).

в качестве эталона для предприятий уранодобывающей промышленности, стремящихся к достижению целей Vision Zero.

Достигнутые результаты согласуются с лучшими международными практиками, такими как концепция Vision Zero, и демонстрируют приверженность компании к соблюдению высоких стандартов безопасности труда. Значительное снижение показателя LTIFR стало возможным благодаря внедрению поведенческих аудитов, активному использованию цифровых инструментов для мониторинга и регулярному обучению сотрудников.

Укрепление корпоративной культуры безопасности труда позволяет компании достигать долгосрочных целей, включая снижение производственных рисков и повышение эффективности управления безопасностью. Эти изменения формируют надежный фундамент для устойчивого развития, минимизации издержек, связанных с травматизмом, и повышения производительности.

Следует учитывать, что проведенный анализ имеет ограничения: влияние сезонных факторов на производственную активность и частоту инцидентов, а также изменения численности и структуры персонала в отдельные годы не анализировались отдельно. Кроме того, исследование основано преимущественно на данных внутренних корпоративных отчетов, что может накладывать зависимость от их полноты и точности. Эти ограничения важно учитывать при интерпретации результатов и планировании дальнейших исследований.

Заключение

Проведенное исследование динамики производственного травматизма в АО «НАК Казатомпром» за 2019-2024 гг.

показало, что последовательное внедрение комплексных мер по охране труда способно обеспечить устойчивое снижение показателей LTIFR даже в условиях высокорискованного производства. Анализ позволил выделить ключевые факторы, определяющие эффективность системы – от технического состояния оборудования до степени вовлеченности персонала в процессы управления безопасностью.

Выявление 2021 г. как периода наибольшего роста травматизма продемонстрировало необходимость систем мониторинга, способных оперативно реагировать на изменение производственной ситуации. Сравнительный анализ с международными компаниями показал, что в 2024 г. уровень LTIFR у Казатомпрома оказался ниже как среднеотраслевых значений, так и показателей ведущих мировых игроков.

С учетом полученных результатов, в качестве приоритетных направлений дальнейшей работы целесообразно:

- расширение цифровизации процессов контроля и анализа рисков;
- разработка адаптивных обучающих программ с учетом стажа и профиля сотрудников;
- регулярная внешняя оценка системы безопасности независимыми экспертами;
- интеграция климатических и сезонных факторов в оценку производственных рисков.

Перспективы дальнейших научных исследований связаны с построением прогнозных моделей изменения LTIFR, оценкой долгосрочного эффекта от применения концепции Vision Zero и выявлением оптимальных комбинаций технических и организационных мер для предприятий с разным уровнем риска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кошкенова М.А., Семенова Д.Ю. Цифровизация уранодобывающей отрасли на примере ТОО «СП «ИНКАЙ». *Экономика предприятий, регионов, стран: актуальные вопросы и современные аспекты: сборник статей X Международной научно-практической конференции, г. Пенза, 05 июня 2023 года*. Пенза: Наука и Просвещение, 2023. С. 48–51. Режим доступа: <https://naukaip.ru/wp-content/uploads/2023/06/MK-1730.pdf#page=48> (дата обращения: 04.06.2025).

Koshkenova M.A., Semenova D.Yu. Digitalization of the uranium mining industry on the example of LLP «SP «INKAI». *Economy of enterprises, regions, countries: actual issues and modern aspects: proceedings of the X Interna-*

tional scientific and practical conference, Penza, June 5, 2023. Penza: Nauka i Prosveshchenie, 2023. P. 48–51. (in Russ.). Available at: <https://naukaip.ru/wp-content/uploads/2023/06/MK-1730.pdf#page=48> (accessed: 04.06.2025).

2. Маликова Р.М., Хайруллаева А.А. Аспекты устойчивого развития урановой промышленности регионов Казахстана. *Актуальные тренды в экономике и финансах: материалы Международной научно-практической конференции, Омск, 19 ноября 2019 года*. Омск: Омский филиал Финансового университета при Правительстве РФ, 2019. С. 280–285. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42522681_93528726.pdf (дата обращения: 06.06.2025).

Malikova R.M., Khairullaeva A.A. Aspects of sustainable development of the uranium industry in the regions of Kazakhstan. *Actual trends in economics and finance: proceedings of the International scientific and practical conference, Omsk, November 19, 2019*. Omsk: Omsk Branch of the Financial University under the Government of the Russian Federation, 2019. P. 280–285. (in Russ.). Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42522681_93528726.pdf (accessed: 06.06.2025).

3. Isakov MM, Trenin AV, Kimolayev ZB, Abulkassimov AB. Overview of the radiation protection system and radiation monitoring at Uranium mining enterprises using ISL method. *International Conference on Radiation Safety (Virtual), Improving Radiation Protection in Practice*, 9–20 November 2020. 2021. P. 349–350. Available at: <https://inis.iaea.org/records/912jw-v1324> (accessed: 02.06.2025).

4. Ералин Ж.М., Гончаренко С.Н. Разработка моделей решения ключевых проблем стратегического развития уранодобывающего предприятия. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;4:199–208. doi: [10.25018/0236-1493-2019-040-199-208](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-040-199-208)

Eralin Zh.M., Goncharenko S.N. Development of models to solve key problems of strategic development of a uranium mining enterprise. *Mining information and analytical bulletin*. 2019;4:199–208. (in Russ.). doi: [10.25018/0236-1493-2019-040-199-208](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-040-199-208)

5. Искаков М.М. К вопросу безопасности труда на уранодобывающих предприятиях Казахстана. *Актуальные проблемы развития научных исследований: теоретический и практический взгляд: сборник статей Международной научно-практической конференции, 10 февраля 2025 г., г. Воронеж. Уфа: Аэтерна, 2025. С. 17–22. Режим доступа: <https://aeterna-ufa.ru/sbornik/NK-649.pdf#page=17> (дата обращения: 04.09.2025).*

Isakov M.M. On the issue of labor safety at uranium mining enterprises in Kazakhstan. *Actual problems of scientific research development*, 2025:17. (in Russ.). Available at: <https://aeterna-ufa.ru/sbornik/NK-649.pdf#page=17> (accessed: 04.09.2025).

6. Умербеков Ж.Ж., Гончаренко С.Н. Обоснование эффективности внедрения целевой модели управления производственной безопасностью горнодобывающей компании. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019;8:225–234. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-effektivnosti-vnedreniya-tselevoy-modeli-upravleniya-proizvodstvennoy-bezopasnostyu-gornodobyvayuschey-kompanii> (дата обращения: 04.09.2025).

Umerbekov Zh.Zh., Goncharenko S.N. Justification of the effectiveness of implementing a target model for production safety management in a mining company. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific-Technical Journal)*, 2019;8:225–234. (in Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-effektivnosti-vnedreniya-tselevoy-modeli-upravleniya-proizvodstvennoy-bezopasnostyu-gornodobyvayuschey-kompanii> (accessed: 04.09.2025).

7. Галкин А.В. Повышение надежности функционирования системы обеспечения безопасности труда – средство снижения производственного риска. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, 2022;5-2:220–232. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/povysheniye-nadezhnosti-funktsionirovaniya-sistemy-obespecheniya-bezopasnosti-truda-sredstvo-snizheniya-proizvodstvennogo-riska> (дата обращения: 04.09.2025).

Galkin A.V. Increasing the reliability of labor safety management system as a means of reducing industrial risk. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific-Technical Journal)*, 2022;5-2:220–232. (in Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/povysheniye-nadezhnosti-funktsionirovaniya-sistemy-obespecheniya-bezopasnosti-truda-sredstvo-snizheniya-proizvodstvennogo-riska> (accessed: 04.09.2025).

8. Гендлер С.Г. и др. Развитие риск-ориентированного подхода для выбора приоритетных направлений снижения производственного травматизма в АО «СУЭК-Кузбасс». *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*, 2021;1:64–76. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-risk-orientirovannogo-podhoda-dlya-vybora-prioritetnyh-napravleniy-snizheniya-proizvodstvennogo-travmatizma-v-ao-suek> (дата обращения: 04.09.2025).

Gendler S.G. et al. Development of a risk-oriented approach for selecting priority directions for reducing occupational injuries in JSC “SUEK-Kuzbass”. *Proceedings of Tula State University. Earth Sciences*, 2021;1:64–76. (in Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-risk-orientirovannogo-podhoda-dlya-vybora-prioritetnyh-napravleniy-snizheniya-proizvodstvennogo-travmatizma-v-ao-suek> (accessed: 04.09.2025).

9. Дикий С.В. Система управления риском травмирования в АО «СУЭК-Кузбасс». *Проблемы недропользования*, 2024;2(41):119–130. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-upravleniya-riskom-travmirovaniya-v-ao-suek-kuzbass> (дата обращения: 04.09.2025).

Dikiy S.V. Risk management system of injuries at JSC “SUEK-Kuzbass”. *Problems of Subsoil Use*, 2024;2(41):119–130. (in Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-upravleniya-riskom-travmirovaniya-v-ao-suek-kuzbass> (accessed: 04.09.2025).

10. Матеро В.С. Анализ травматизма в горнорудной промышленности. *World Science: Problems and Innovations*, 2021:73–76. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_47290497_68831460.pdf (дата обращения: 04.09.2025).

Matero V.S. Analysis of injuries in the mining industry. *World Science: Problems and Innovations*, 2021:73–76 (in Russ.). Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_47290497_68831460.pdf (accessed: 04.09.2025).

11. Комиссарова В.Ю., Матюшева Н.В. Совершенствование условий труда работников производства с помощью концепции «Vision Zero», или «нулевой травматизм». *Вестник Студенческого научного общества*, 2019;10(2):123–125. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_39951219_18754403.pdf (дата обращения: 04.09.2025).

Komissarova V.Yu., Matyusheva N.V. Improvement of working conditions of production workers using the «Vision Zero» concept or «zero injuries». *Bulletin of the Student Scientific Society*, 2019;10(2):123–125. (in Russ.). Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_39951219_18754403.pdf (accessed: 04.09.2025).

12. Зиганшина Е.С. Практические инструменты создания и развития культуры производственной безопасности. *Экспериментальная наука: механизмы, трансформации*, 2024:20. Режим доступа: <https://ami.im/sbornik/MNPK-579.pdf#page=20> (дата обращения: 04.09.2025).

Ziganshina E.S. Practical tools for creating and developing a culture of industrial safety. *Experimental Science: Mechanisms, Transformations*, 2024:20. (in Russ.). Available at: <https://ami.im/sbornik/MNPK-579.pdf#page=20> (accessed: 04.09.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Искаков М.М. – изучение теоретических источников по проблематике изучаемой проблемы для формирования методического аппарата анализа и оценки предметной области исследования, написание текста статьи, вычитка работы;

Медведева Ю.М. – концепция и качественная разработка исследования, внесение корректив и уточнений в работу.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Iskakov M.M. – studying theoretical sources on the subject matter to develop a methodological framework for analysing and evaluating the subject area of the research, writing the text of the article, proofreading the work;

Medvedeva Yu.M. – conceptualisation and qualitative development of the research, making corrections and clarifications to the work.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

FUNDING:

The study had no external funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

CONFLICT OF INTEREST:

There is no conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Манас Мырзахевич Искаков, магистр, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: m.m.iskakov@mail.ru

Юлия Михайловна Медведева, кандидат экономических наук, доцент, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-5654-5398>

e-mail: 13yulia78@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Manas M. Iskakov, Master's Degree, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

email: m.m.iskakov@mail.ru

Yulia M. Medvedeva, Cand. Sci. (Econom), Associate Professor, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-5654-5398>

e-mail: 13yulia78@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 30.04.2025

После доработки / Revision 02.07.2025

Принята к публикации / Accepted 08.07.2025

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аркадов Г.В.	57
Бакулин В.В.	43
Валеев Р.Ш.	6
Внуков Р.А.	77
Войтенко А.С.	6
Воробьев Е.В.	36
Джарум Б.	26
Завадский Д.И.	14
Зайкин И.И.	6
Зимин В.Г.	26
Ивахин С.В.	26
Искаков М.М.	108
Исупов И.В.	93
Карандеева Н.В.	43
Колесов В.В.	77
Кудратов В.Н.	26
Медведева Ю.М.	108
Микшин И.А.	36
Молев И.А.	26
Плотников Д.А.	26
Поваров В.П.	43
Попов М.А.	77
Романенко В.И.	26
Рясный С.И.	6
Сесекин А.Н.	14
Слепов М.Т.	57
Соловьев Д.А.	26
Татарских Д.А.	14
Ташлыков О.Л.	14
Фокина О.В.	93
Ченцова А.Ю.	36
Шапошникова Н.Ю.	36

AUTHOR INDEX

Arkadov G.V.	57
Bakulin V.V.	43
Chentsova A.Yu.	36
Djaroum B.	26
Fokina O.V.	93
Iskakov M.M.	108
Isupov I.V.	93
Ivakhin S.V.	26
Karandeeva N.V.	43
Kolesov V.V.	77
Kudratov V.N.	26
Medvedeva Yu.M.	108
Mikshin I.A.	36
Molev I.A.	26
Plotnikov D.A.	26
Popov M.A.	77
Povarov V.P.	43
Romanenko V.I.	26
Ryasny S.I.	6
Sesekin A.N.	14
Shaposhnikova N.Yu.	36
Slepov M.T.	57
Solovyev D.A.	26
Tashlykov O.L.	14
Tatarskikh D.A.	14
Valeev R.Sh.	6
Vnukov R.A.	77
Vorobiev E.V.	36
Voytenko A.S.	6
Zaikin I.I.	6
Zavadskii D.I.	14
Zimin V.G.	26

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.

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 упоминаться 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:

- 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://elib.pnzu.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://elib.pnzu.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 (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 (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>

Адрес редакции журнала:

347360, Россия, Ростовская область, г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94

Редакция журнала «Глобальная ядерная безопасность», oni-viti@mephi.ru:

Выпускающий редактор:

Лобковская Надежда Ивановна

+79281883628

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:

- 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. Polyanin 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. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):55–70. (In Russ.). EDN: SAGHCF. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-06>

Editorial office address (for sending printed correspondence):
 347360, Russia, Rostov region, Volgodonsk, Lenin Street, 73/94
 Editorial office of «Nuclear Safety» journal
 oni-viti@mephi.ru:
 Executive Editor:
 Nadezhda I. Lobkovskaya
 +79281883628
 NILobkovskaya@mephi.ru
